

Uma Modelagem da Mobilidade Individual para Redes Móveis *Ad hoc*

por

Carlos Alberto Vieira Campos



UFRJ

Tese submetida para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia de Sistemas e Computação

ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Sistemas e Computação

Coordenação de Pesquisas e Pós-graduação em Engenharia da UFRJ

por

Carlos Alberto Vieira Campos

Dezembro de 2003

UMA MODELAGEM DA MOBILIDADE INDIVIDUAL
PARA REDES MÓVEIS *AD HOC*

Carlos Alberto Vieira Campos

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE SISTEMAS E COMPUTAÇÃO.

Aprovada por:

Prof. Luis Felipe Magalhães de Moraes, Ph. D.

Prof. Claudio Luis Amorim, Ph. D.

Prof. Antônio Alfredo Ferreira Loureiro, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2003

CAMPOS, CARLOS ALBERTO VIEIRA

Uma Modelagem da Mobilidade Individual para Redes Móveis *Ad hoc* [Rio de Janeiro] 2003

XVII, 98 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia de Sistemas e Computação, 2003)

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pesc/COPPE

1. Modelos de Mobilidade
2. Redes Móveis *Ad hoc*
3. Avaliação de Desempenho

I. COPPE/UFRJ II. Título (Série)

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha querida mãezinha, que foi e será a pessoa mais importante na minha vida. Não preciso nem dizer que devo a minha vida à Deus e aos meus pais, mas, se consegui chegar até aqui, são por méritos e imensuráveis esforços dela, que foi a minha fonte abundante de amor, humildade, sabedoria, honestidade, perseverança e companheirismo. Ela, mais do que ninguém, esperava por este momento mas, tenho certeza que de onde estiver, estará vibrando por mais esse desafio superado em prol de minha realização profissional e pessoal.

MINHA QUERIDA MÃEZINHA:

OBRIGADO POR TUDO E TENHA CERTEZA DE QUE VOCÊ ENCERROU A SUA JORNADA AQUI NA TERRA COM "CHAVE DE OURO", SENDO UM EXCELENTE EXEMPLO DE FILHA, IRMÃ, ESPOSA E MÃE, PROPAGANDO O AMOR, A HUMILDADE, A VERDADE, O COMPANHEIRISMO, A UNIÃO E A DEDICAÇÃO À FAMÍLIA, PARA TODOS EM SEU ENTORNO.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus, por eu existir e por tudo que tenho: saúde, família e amigos.

Aos meus pais, Walter e Elísia, pelo amor e apoio recebido, e por tudo que sou. Sem eles, eu não teria chegado até aqui. Obrigado por tudo!!!

À minha irmã, Margareth, pela amizade, carinho e incentivo.

À Roberta, minha namorada, pelo incentivo, compreensão nos momentos difíceis, apoio e carinho.

Ao meu orientador, Prof. Luis Felipe, pela oportunidade de trabalho, pela confiança que depositou em mim, pela sua orientação, ensinamentos, apoio e amizade.

Aos Profs. Antônio Alfredo e Claudio Amorim por participarem da banca de avaliação do trabalho, contribuindo com correções e sugestões.

Ao Alexandre Mendes, pela grande ajuda na implementação do modelo no gerador de cenários.

Ao Daniel, Fernando, Kleber e Paulo pela ajuda na solução de problemas ocorridos durante o desenvolvimento do trabalho, pelas inúmeras sugestões, contribuições e pela amizade.

À toda equipe do Laboratório RAVEL e principalmente aos integrantes do GARF, pelas intensas discussões sobre redes sem fio, modelagem e simulações, pelo apoio, convivência e amizade.

Aos meus familiares e amigos, em especial: Tia Geralda, Breno, Emília, In-

grid, Amanda, Beatriz, Berlice, Berardo, Guto, Bernardo, Aline, Rezende, Saulo, Bernardo Vilela, Pedro, Belém, Biba, Denílson, Isaac, Cléber, Daniela, Liliane, Rosivaldo, Sérgio, Assunção, Mariléia, Paulo César e outros, pelo incentivo, apoio e amizade.

Ao PESC/COPPE pelo suporte operacional e equipamentos utilizados.

À CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

UMA MODELAGEM DA MOBILIDADE INDIVIDUAL PARA REDES MÓVEIS *AD HOC*

Carlos Alberto Vieira Campos

Dezembro/2003

Orientadores: Luis Felipe Magalhães de Moraes
Programa: Engenharia de Sistemas e Computação

Modelos de Mobilidade visam representar o comportamento de movimentação dos dispositivos móveis numa rede *ad hoc*. Esses modelos são usados na avaliação do desempenho de aplicações e sistemas de comunicação, permitindo analisar o impacto causado pela mobilidade no funcionamento dos mesmos. Dentro desse contexto, propõe-se nesse trabalho modelos de mobilidade individual para redes móveis *ad hoc*. Esses modelos foram baseados em processos markovianos e têm como objetivo representar uma maior liberdade de movimentação dos dispositivos móveis. Através dos modelos aqui propostos, permitem-se movimentos na mesma direção, em direções adjacentes, acelerações e intervalos de pausa no movimento, além de evitar mudanças bruscas de direção e paradas abruptas. Dessa forma, busca-se uma maior aproximação do movimento real dos usuários num ambiente urbano e em rodovias. Os modelos propostos são descritos analiticamente através de cadeias de Markov e são apresentadas comparações, feitas através de simulação, entre os Modelos Propostos, o Modelo *Waypoint* e o Modelo Markoviano de Percurso Aleatório. Por fim, esses modelos foram aplicados em cenários de redes móveis *ad hoc*, avaliando o impacto desses no desempenho dos protocolos de roteamento AODV, DSDV e DSR.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

A MODELING OF THE INDIVIDUAL MOBILITY FOR MOBILE AD HOC NETWORKS

Carlos Alberto Vieira Campos

December/2003

Advisors: Luis Felipe Magalhães de Moraes

Department: Computer and System Engineering

Mobility Models try to represent the movement behavior of mobile devices in Mobile Ad hoc Networks. These models are used in performance evaluation of applications and communication systems and, this way, they allow the analysis of the mobility impact. In this context, it is proposed in this thesis Individual Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks. These models were based in markovians process and intend to represent a wider movement ability of devices. Using the proposed models is possible to move in the same direction, in adjacent directions, to accelerate and to stop, besides avoiding sharp turns and sudden stops. This way, it is tried a representation closer to the real movement of the users in an urban enviroment and in roads. In the work, the proposed models are described analytically by Markov Chains and are presented comparisons, by using simulation, between the Proposed Models, the Waypoint Model and the Random Walk Markovian Model. These models were applied on the routing protocols AODV, DSDV and DSR, allowing the evaluation of the impact caused by the mobility models on those.

Palavras-chave

1. Modelos de Mobilidade
2. Redes Móveis *Ad hoc*
3. Avaliação de Desempenho

Glossário

AODV :	<i>Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing;</i>
CBR :	<i>Constant Bit Rate;</i>
DCF :	<i>Distributed Coordination Function;</i>
DSDV :	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector;</i>
DSR :	<i>Dynamic Source Routing;</i>
IEEE :	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers;</i>
IETF :	<i>Internet Engineering Task Force;</i>
MANET :	<i>Mobile Ad hoc Networks;</i>
MMIG :	Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico;
MMIS :	Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Simples;
MGPR :	Modelo de Mobilidade em Grupo baseado num Ponto de Referência;
MGVR :	Modelo de Mobilidade em Grupo baseado numa Velocidade de Referência;
MPA :	Modelo Markoviano de Percurso Aleatório;
NM :	Nó Móvel;
NS :	<i>Network Simulator;</i>
OLSR :	<i>Optimized Link State Routing Protocol;</i>
RFC :	<i>Request-for-Comments;</i>
TBRPF :	<i>Topology Dissemination Based on Reverse-Path Forwarding;</i>
TCP/IP :	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol;</i>
ZRP :	<i>Zone Routing Protocol.</i>

Sumário

Resumo	vi
Abstract	vii
Lista de Acrônimos	ix
1 Introdução	1
1.1 As Redes Móveis <i>Ad hoc</i>	1
1.2 Motivação	4
1.3 Objetivos	5
1.4 Contribuições do Trabalho	6
1.5 Organização do Texto	7
2 Modelos de Mobilidade	8
2.1 Visão Geral	8
2.2 Modelos de Mobilidade para Redes <i>Ad hoc</i>	10
2.2.1 Modelos de Mobilidade Individual	11
Modelo de Mobilidade Aleatória	12
Modelo de Mobilidade <i>Waypoint</i>	13

Modelo Markoviano de Percurso Aleatório - MPA	14
Modelo de Mobilidade <i>Smooth Random</i>	15
2.2.2 Modelos de Mobilidade em Grupo	16
Modelo de Mobilidade em Grupo com Ponto de Referência - MMGPR	17
Modelo de Mobilidade em Grupo baseado numa Velocidade de Referência - MMGVR	19
2.3 Regras de Borda para Simulação de Áreas Limitadas	19
2.3.1 <i>Bounce</i>	20
2.3.2 <i>Delete and Replace</i>	20
2.3.3 <i>Wrap around</i>	21
3 Propostas de Modelos de Mobilidade Individual	23
3.1 Visão Geral	23
3.2 Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Simples - MMIS	25
3.2.1 Modelagem Analítica	25
3.2.2 Perfis de Mobilidade	28
Perfil de Mobilidade MMISa	29
Perfil de Mobilidade MMISb	30
Perfil de Mobilidade MMISc	32
Perfil de Mobilidade MMISd	33
3.3 Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico - MMIG	35
3.3.1 Modelagem Analítica	35
3.3.2 Perfis de Mobilidade	42

Perfil de Mobilidade MMIGa	42
3.4 Avaliação dos Modelos Propostos	42
3.4.1 Métricas de Desempenho	44
3.4.2 Cenários das Simulações	45
3.4.3 Resultados Obtidos	46
4 Aplicações dos Modelos Propostos em Cenários de Redes Móveis	
<i>Ad hoc</i>	55
4.1 Protocolos de Roteamento para Redes Móveis <i>Ad-hoc</i>	55
4.1.1 Protocolos de Roteamento Pró-ativos	57
4.1.2 Protocolos de Roteamento Reativos	58
4.2 Avaliação do Impacto dos Modelos de Mobilidade no Desempenho dos Protocolos AODV, DSDV e DSR	60
4.2.1 Métricas	60
4.2.2 Ambiente da Simulação	61
4.2.3 Resultados Obtidos	62
4.3 Aplicação dos Modelos Propostos em Outros Cenários	69
5 Conclusão e Perspectivas para Trabalhos Futuros	71
Referências Bibliográficas	74
A Implementação da Modelagem Proposta	80
B O <i>Scenario Generator</i> – ScenGen	90
B.1 A Ferramenta	90

B.1.1	Configurações da Simulação	91
B.1.2	Adicionando um Modelo	93
C	<i>Network Simulator</i> – NS	96

Lista de Figuras

2.1	<i>Framework</i> da representação da mobilidade nas comunicações sem fio [1].	9
2.2	Percurso de um NM usando o <i>waypoint</i>	13
2.3	Diagramas de transições de estado do modelo MPA.	15
2.4	Comportamento de desaceleração antes de uma mudança de direção no modelo <i>smooth random</i> [1]	16
2.5	Modelo MGPR [2].	18
2.6	Regra de borda <i>bounce</i>	20
2.7	Regra de borda <i>delete and replace</i>	21
2.8	Regra de Borda <i>Wrap around</i>	21
3.1	Diagramas de transições de estado do modelo MMIS.	26
3.2	Diagrama de transição de estado com 2 eventos (eixo x e y)	27
3.3	Diagrama de transições de estado do perfil de mobilidade MMISa.	30
3.4	Percurso de dois nós seguindo o perfil de mobilidade MMISa.	31
3.5	Percurso dos nós seguindo o perfil MMISb	32
3.6	Percurso de vários nós seguindo o perfil MMISc	33
3.7	Percurso de vários nós seguindo o perfil MMISd	34

3.8	Diagrama de transição de estado do modelo MMIG	37
3.9	Diagrama de transição de estado do perfil MMIGa	43
3.10	Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 90^\circ$	47
3.11	Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 135^\circ$	48
3.12	Variação da velocidade média.	49
3.13	Variação brusca da velocidade $\geq 50\%$ no modelo <i>waypoint</i>	51
3.14	Variação brusca da velocidade $\geq 50\%$ no modelo MMIG.	52
3.15	Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 90^\circ$ no modelo MMIG com diferentes regras de borda	53
4.1	Taxa de entrega de pacotes dos protocolos de roteamento utilizando o modelo MMIG.	65
4.2	Taxa de entrega do protocolo AODV sob o impacto do modelo de mobilidade utilizado.	66
4.3	Taxa de entrega do protocolo DSR sob o impacto do modelo de mo- bilidade utilizado.	66
4.4	O impacto da escolha da regra de borda para o modelo MMIG no desempenho do protocolo AODV.	67
4.5	A influência do tráfego no desempenho do protocolo AODV usando a regra de borda <i>bounce</i>	68
4.6	O impacto da quantidade de tráfego no desempenho do protocolo AODV usando a regra de borda <i>bounce</i> modificado.	68
4.7	O impacto da quantidade de tráfego no desempenho do protocolo AODV usando a regra de borda <i>delete and replace</i>	69

B.1 O visualizador Adhockey 90

Lista de Tabelas

4.1	A influência dos modelos de mobilidade no desempenho do protocolo AODV.	62
4.2	A influência dos modelos de mobilidade no desempenho do protocolo DSR.	64

Capítulo 1

Introdução

As redes de comunicação sem fio vêm adquirindo importância cada vez maior nos últimos anos, fato este que pode ser observado pelo aumento da demanda por este tipo de tecnologia e sua utilização cada vez mais freqüente nas empresas, indústrias e universidades. Dentro desse contexto, existem as redes móveis *ad hoc* que são o objeto de estudo desse trabalho. Essas redes serão descritas na seção abaixo.

1.1 As Redes Móveis *Ad hoc*

As redes móveis *ad hoc* são tecnologias de comunicação sem fio, onde os dispositivos computacionais móveis são capazes de trocar informações diretamente entre si ou através de múltiplos saltos sem a necessidade de uma infra-estrutura de comunicação [3, 4, 5]. Assim sendo, os dispositivos computacionais possuem a capacidade de ser, tanto um roteador, quanto um dispositivo de comunicação terminal ou ainda, ambos simultaneamente, dando à rede a característica de auto-configuração dinâmica.

Com essas características, as redes *ad hoc* são indicadas para situações onde não se pode, ou não é adequado instalar uma rede fixa ou uma rede sem fio infra-estruturada como, por exemplo, uma rede de telefonia celular. Por isso, estão surgindo tecnologias como o padrão *Bluetooth* e redes de sensores, que são tipos de redes

ad hoc [4]. Nesse trabalho, os dispositivos computacionais móveis serão denominados de nós móveis - NMs.

Como cenários de utilização de redes *ad hoc* pode-se citar:

- Campos de batalhas, onde, aviões, helicópteros, tanques de guerra e militares trocam informações táticas;
- Empresários compartilhando informações numa reunião;
- Vendedores comunicando-se no centro comercial de uma cidade;
- Equipes de resgate e salvamento numa situação de desastre, como furacão, terremoto ou inundação, onde estas precisam se coordenar;
- Estudantes usando computadores portáteis para participar de uma aula interativa.

Com o objetivo de estudo e padronização desse tipo de rede, a IETF (*Internet Engineering Task Force*) criou um grupo de trabalho dentro da sub-área de roteamento, denominado *Mobile Ad hoc Networks* - MANET [6]. Esse grupo de trabalho já publicou três *Request-for-Comments* - RFCs: uma sobre a visão geral das redes *ad hoc*, RFC 2501 [3] e, recentemente, outras duas sobre os algoritmos de roteamento: *Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing* - AODV, RFC 3561 [7] e *Optimized Link State Routing Protocol* - OLSR, RFC 3626 [8]. Além das RFCs, diversos *drafts* vêm sendo propostos pelo grupo MANET.

Dentro desse contexto, são descritas as principais características de uma rede *ad hoc* [3, 9]: topologia dinâmica, largura limitada de banda, segurança física limitada.

Topologia dinâmica: os NMs podem se locomover de forma independente ou em grupos, fazendo com que a topologia da rede seja dinâmica, ou seja, a topologia muda sua configuração frequentemente. Além disso, os enlaces podem ser unidirecionais ou bidirecionais;

Largura limitada de banda: os enlaces sem fio continuam tendo menor capacidade do que enlaces das redes fixas cabeadas;

Segurança física limitada: as redes sem fio são mais vulneráveis às ameaças do que as redes fixas, tendo uma maior possibilidade de escuta e invasão.

Como vantagens podem ser citadas: rápida instalação, tolerância à falhas, conectividade e mobilidade.

Rápida instalação: podem ser instaladas rapidamente em locais sem nenhuma infra-estrutura prévia;

Tolerância à falhas: o mal funcionamento ou o desligamento de um dispositivo pode ser facilmente sanado com a reconfiguração dinâmica da rede. Em uma rede fixa, ao contrário, quando ocorre uma falha em um roteador, o redirecionamento de tráfego é uma operação complexa, quando possível. Falhas em redes estruturadas são mais graves ainda se ocorrerem no ponto de acesso dos dispositivos sem fio, pois todos os nós dependentes deste ficam sem comunicação;

Conectividade: se duas estações estão dentro da área de alcance das ondas de rádio, elas têm um canal de comunicação direto. Em uma rede fixa, mesmo que duas estações estejam uma ao lado da outra é necessário que as estações estejam ligadas por um meio guiado para que troquem informações. Em uma rede estruturada é necessária a comunicação do dispositivo móvel com o ponto de acesso e deste para o outro dispositivo móvel;

Mobilidade: os dispositivos móveis podem movimentar-se durante o período de conexão na rede.

Como desvantagens podem ser citadas [9]: difícil localização e roteamento complexo.

Localização: existe a dificuldade de identificar a posição física do NM e enviar, para esse ponto, suas mensagens. Em redes fixas não existe essa dificuldade, pois o endereço IP indica implicitamente a localização do nó. Para redes infra-estruturadas esse problema foi resolvido através do protocolo IP-Móvel, que se encarrega de localizar o nó. Já em redes *ad hoc*, localizar o NM é um problema, pois não se tem nenhuma informação geográfica e o endereço da máquina não tem necessariamente nenhuma relação com sua posição;

Roteamento: em uma rede fixa a topologia dificilmente se altera, os nós ficam geralmente nas mesmas posições da rede. Em uma rede *ad hoc* os nós podem se mover de uma região para outra de forma não determinística, fazendo com que uma rota válida entre dois nós torne-se uma rota inválida. Neste caso é necessário encontrar, de alguma forma, uma outra rota válida entre os nós em questão. Com isso, a mudança na topologia afeta o desempenho da rede.

Dessa forma, as redes móveis *ad hoc* possuem características específicas, onde a mobilidade influencia o funcionamento de todos os seus componentes, protocolos e aplicações. Além disso, o roteamento e a segurança são tarefas complexas. Uma rota entre dois NMs, numa rede *ad hoc*, pode ser formada por um ou vários saltos através dos NMs na rede. Um dos principais problemas em redes *ad hoc* é gerenciar as rotas, já que a mobilidade de um NM pode causar mudanças na topologia. Por isso vários protocolos de roteamento foram e estão sendo propostos e desenvolvidos para realizar esta tarefa de maneira mais eficiente.

Após a caracterização do contexto desse trabalho, serão descritas nas seções abaixo, as motivações, os objetivos e as contribuições dessa dissertação. Por fim, será apresentado um resumo dos capítulos do texto.

1.2 Motivação

Dentre as redes sem fio, muitos estudos têm sido feitos em torno das redes móveis *ad hoc*. Estas redes não necessitam da disponibilidade de uma infra-estrutura, gerando maior flexibilidade e acrescentando novas aplicações à tecnologia sem fio. No entanto, nestas redes, a mobilidade dos usuários acrescenta problemas que devem ser tratados, devido principalmente ao dinamismo da topologia da rede. Além disso, o desempenho de soluções propostas (aplicações e subsistemas) para redes móveis *ad hoc* é afetado diretamente pela mobilidade dos usuários, fazendo com que esta deva ser levada em consideração em qualquer avaliação de protocolos e soluções propostas. Acrescenta-se ainda que uma mesma aplicação ou protocolo pode apresentar desempenho bem diferente quando o comportamento de movimentação dos

usuários muda. Sendo assim, representar a movimentação dos usuários de maneira realística e avaliar o seu impacto no funcionamento das redes móveis *ad hoc*, ainda são problemas a serem solucionados.

1.3 Objetivos

O objetivo deste trabalho é propor dois novos modelos de mobilidade para representar a movimentação dos usuários numa rede móvel *ad hoc*. Além disso, uma avaliação de desempenho de alguns protocolos de roteamento, baseada no impacto do modelo de mobilidade utilizado, será apresentada.

A modelagem proposta apresenta três vantagens principais:

- pequeno número de parâmetros de configuração dos modelos;
- geração de vários perfis de mobilidade específicos;
- representação da mobilidade mais realística que os modelos *random walk* e *waypoint*.

A descrição da modelagem analítica, os perfis de mobilidade e a avaliação dos modelos propostos são apresentados em detalhe. Para realizar o estudo dos modelos foi utilizado um gerador de cenários de mobilidade, onde os modelos foram implementados através da linguagem de programação C++. Através de métricas de desempenho definidas nesse trabalho foram avaliados os modelos: *waypoint*, modelo markoviano de percurso aleatório e os novos modelos de mobilidade propostos nessa dissertação.

Além disso, foi elaborado um estudo de caso de como os modelos propostos podem ser aplicados. Esse estudo de caso foi realizado através do simulador *network simulator* (NS) [10], onde é avaliado o impacto do modelo de mobilidade escolhido na avaliação de desempenho de alguns protocolos de roteamento para as redes móveis *ad hoc*.

Buscando-se alcançar esses objetivos, na próxima seção serão descritas as con-

tribuições deste trabalho.

1.4 Contribuições do Trabalho

Com a elaboração deste trabalho, as seguintes contribuições podem ser relacionadas:

- O desenvolvimento de novos modelos de mobilidade que possuem características mais realísticas que dos modelos mais utilizados na literatura, que são os modelos de mobilidade aleatória e o *waypoint*;
- A construção de uma modelagem contendo um pequeno número de parâmetros de configuração, tornando fácil a sua manipulação e geração de resultados;
- A geração de vários perfis de mobilidade específicos, o que possibilita uma representação mais próxima da realidade dos ambientes de simulação dessas redes;
- A geração de uma modelagem bastante genérica e abrangente, de forma a representar um grande e variado conjunto de cenários distintos;
- A definição e utilização de métricas de avaliação do próprio comportamento de movimentação do NM;
- A obtenção de novos resultados na avaliação de desempenho dos protocolos: AODV, DSDV e DSR, baseada na influência do modelo de mobilidade e regra de borda utilizada;
- A implementação dos modelos propostos numa ferramenta de código aberto;
- A descrição de diversas áreas (aplicações e sub-sistemas de redes móveis *ad hoc*), em que os modelos propostos podem ser aplicados para uma avaliação das mesmas.

1.5 Organização do Texto

Os capítulos estão organizados da seguinte forma. No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica da caracterização da mobilidade para as redes sem fio infra-estruturadas e sem infra-estrutura, dos tipos de modelos de mobilidade existentes para redes móveis *ad hoc* e das regras de borda para simulação de áreas limitadas.

O capítulo 3 apresenta os dois modelos de mobilidade propostos por este trabalho. Neste capítulo é descrita a modelagem analítica dos modelos propostos, todo o processo de geração de cenários de simulação e a avaliação dos modelos propostos, por métricas definidas, através de uma comparação com os modelos: *waypoint* e markoviano de percurso aleatório.

No capítulo 4 são mostrados alguns estudos de casos de aplicações dos modelos e seus resultados. Nesse capítulo são apresentados novos resultados sobre o impacto do uso de modelos de mobilidade e regras de borda na avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento AODV, DSDV e DSR. Os resultados são obtidos utilizando-se os modelos propostos, além do modelo *waypoint*, que é o mais utilizado na literatura. O capítulo discute ainda outras situações nas quais os modelos propostos podem ser aplicados.

Por fim, o capítulo 5 faz os comentários finais sobre o trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Modelos de Mobilidade

NESSE capítulo é apresentado um *framework* dos componentes da modelagem da mobilidade em redes móveis. Em seguida, são descritos os principais modelos de mobilidade para redes móveis *ad hoc*, classificados em dois tipos: mobilidade individual e mobilidade em grupo. Por fim, as regras de borda para simulação de áreas limitadas são descritas em detalhes.

2.1 Visão Geral

Atualmente existem duas maneiras de se representar a movimentação de usuários de uma rede móvel [5, 11]. Uma forma é através da captura de informações do comportamento real de movimentação do NM, ou seja, com o uso de registros de movimentação (*traces*). A outra maneira é através da utilização de modelos de mobilidade sintéticos, onde tenta-se representar o comportamento de movimentação dos nós sem o uso desses registros de movimentação.

A captura dos registros de movimentação possibilita uma observação do comportamento real de movimentação dos NMs, principalmente quando se tem um grande número de nós durante um longo período de observação. Entretanto, em ambientes muito dinâmicos, como em redes móveis *ad hoc*, capturar esses registros não é uma tarefa fácil, devido ao fato dessas redes não estarem em ativo uso e, quando se trata

de dados confidenciais, há uma dificuldade maior ainda de acesso aos mesmos.

Além disso, as redes móveis *ad hoc* ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento, o que dificulta a obtenção de *traces* de cenários reais. Assim, é necessária a utilização de modelos de mobilidade sintéticos para representar a movimentação dos NMs. Esses modelos são classificados em duas categorias [5, 11, 2]: modelos para redes de telefonia celular e modelos para redes móveis *ad hoc*.

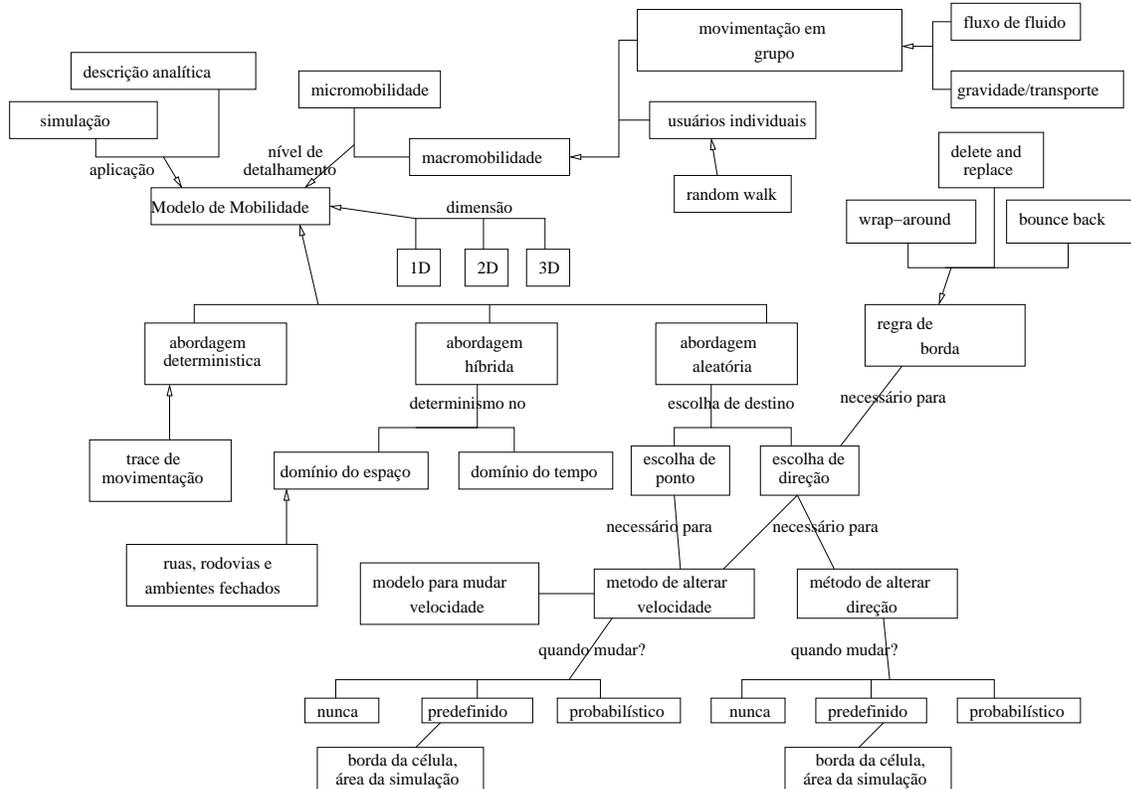


Figura 2.1: *Framework* da representação da mobilidade nas comunicações sem fio [1].

Dentro do contexto da modelagem da mobilidade, Bettstetter apresenta em [1] um *framework* da representação da mobilidade usada na simulação e análise de sistemas de comunicações sem fio. Como pode ser visto na figura 2.1, a representação da mobilidade é realizada através dos componentes: nível de aleatoriedade (determinística, híbrida ou aleatória), nível de detalhamento (micromobilidade, macromobilidade, movimentação individual ou em grupo), representação por simulação ou por modelagem analítica, quantidade de dimensões (1D, 2D ou 3D) e na escolha

da nova direção da abordagem aleatória, pode-se utilizar diferentes regras de borda para a área representada. Esses componentes do *framework* foram utilizados pela modelagem proposta nesse trabalho e que será apresentada no capítulo 3. Além disso, essa representação pode ser aplicada tanto nas redes sem infra-estrutura (rede móvel *ad hoc*), quanto nas redes sem fio infra-estruturadas (rede celular).

A modelagem da mobilidade dos usuários de uma rede celular já foi bastante estudada e desenvolvida na literatura [1, 12, 13, 14], apesar de ainda ser estudada e novas propostas estarem surgindo, como [15]. Nessas redes, a mobilidade dos usuários influencia diversos aspectos relacionados ao tráfego dos dados e à carga de sinalização na rede, bem como o gerenciamento dos recursos de rádio (esquemas de alocação de canal e técnicas de múltiplo acesso ao meio), da propagação e rádio-transmissão (interferência co-canal e gerenciamento do *handoff*).

Além disso, surge a necessidade de suporte à mobilidade dos usuários, onde é necessário gerenciar o deslocamento dos usuários através de mecanismos, como: registro e localização do usuário, atualização de localização, estratégias de *paging* e *handoff*. Para o funcionamento eficiente desses procedimentos é necessária uma adequação entre esses e o comportamento de movimentação dos usuários.

Este trabalho abrange modelos de mobilidade para redes *ad hoc*. A próxima seção aborda tais modelos em mais detalhes.

2.2 Modelos de Mobilidade para Redes *Ad hoc*

Como foi dito anteriormente, os modelos de mobilidade buscam representar o comportamento de movimentação dos usuários numa rede móvel. A diferença é que em redes móveis *ad hoc*, esses modelos simulam, geralmente, a movimentação de usuários dentro da área de simulação, diferente das redes de telefonia celular, onde a movimentação é representada em células, que são áreas de alcance das antenas das estações rádio-base (ERB). Esses modelos são usados na simulação das redes móveis *ad hoc* para a avaliação do desempenho de aplicações, sub-sistemas e com-

ponentes dessas redes, permitindo analisar o impacto causado pela mobilidade no funcionamento dos mesmos.

Como exemplos de ambientes onde se aplicam os modelos de mobilidade, têm-se: aplicações de gerenciamento de distribuição de chave criptográfica, suporte à descoberta de serviços, suporte ao gerenciamento do tráfego da rede, avaliação da perda de pacotes [16], avaliação da capacidade, avaliação dos protocolos de roteamento [11, 17], predição do particionamento da rede [18], cobertura de serviços em redes *ad hoc* particionáveis [19] e protocolos de acesso ao meio para redes *ad hoc* [20].

Esses modelos são classificados em dois tipos: modelos de mobilidade individual e modelos de mobilidade em grupo, que serão descritos a seguir.

2.2.1 Modelos de Mobilidade Individual

São modelos que representam o comportamento de movimentação de um NM de forma independente do restante dos NMs da rede. Consiste numa modelagem mais simples e de fácil implementação, visto que a representação dos NMs é realizada através de eventos independentes, não tendo nenhuma correlação entre estes. Devido a tais características, esses modelos são os mais usados na literatura para avaliação de sistemas em redes móveis *ad hoc* [5].

Os modelos de mobilidade individual têm importante aplicação na predição da disponibilidade dos enlaces sem fio, afim de melhorar, por exemplo, a eficiência dos protocolos de roteamento, contribuindo para a construção de rotas mais estáveis. Em redes móveis *ad hoc*, a causa das mudanças na disponibilidade dos enlaces sem fio são as mudanças locais na topologia da rede e esse comportamento é representado pelos modelos de mobilidade individual.

Nas seções abaixo, serão descritos os principais modelos de mobilidade individual: modelo de mobilidade aleatória, modelo *waypoint*, modelo markoviano de percurso aleatório e o modelo *smooth random*.

Modelo de Mobilidade Aleatória

O modelo de mobilidade aleatória é o modelo de mobilidade de percurso aleatório (*Random Walk Mobility Model*) [5, 12, 21] para as redes de telefonia celular e que também é aplicado em redes móveis *ad hoc*. Ainda hoje, é um dos modelos mais utilizados pelos pesquisadores para avaliação de protocolos em redes *ad hoc* [2] devido à sua simplicidade de implementação e utilização.

O seu funcionamento ocorre da seguinte forma: inicialmente o NM é posicionado aleatoriamente na área de simulação, então, é escolhido um ângulo de direção, uniformemente distribuído entre $[0, 2\pi]$ e uma velocidade também uniformemente distribuída entre os valores: velocidade mínima (v_{min}) e velocidade máxima (v_{max}). Escolhido o ângulo de direção e o valor da velocidade, o NM percorre o caminho pela direção escolhida por um período constante de tempo (t). Após passado o período de tempo t , o NM escolherá uma nova direção e uma nova velocidade. Essa rotina se repetirá até o fim da simulação.

Dessa maneira, o modelo aleatório tem a seguinte característica: a direção e a velocidade do movimento, num novo instante de tempo, não tem relação nenhuma com os valores de instantes anteriores, ou seja, é um modelo de mobilidade sem memória. Por isso, esse modelo pode gerar comportamentos não realísticos, como: mudanças bruscas de direção, paradas abruptas e acelerações bruscas no movimento do NM.

Algumas modificações para esse modelo têm sido propostas. Por exemplo, em [22], os NMs possuem uma direção aleatória, mas uma velocidade constante durante todo o tempo de simulação. Em [23], os NMs percorrem um caminho que é formado de vários segmentos. O tamanho desses segmentos segue uma distribuição exponencial, a direção de cada segmento é escolhida de forma aleatória e a velocidade é uniformemente distribuída entre $[1, n]$.

Modelo de Mobilidade *Waypoint*

O modelo de mobilidade *waypoint*, descrito em [5, 24], divide o percurso de um NM em períodos de movimentação e pausa. O NM fica num local por um determinado intervalo de tempo, denominado de tempo de pausa e depois, move-se para um novo local escolhido aleatoriamente com uma velocidade que segue uma distribuição uniforme entre $[v_{min}, v_{max}]$, conforme ilustrado na figura 2.2. Através da configuração do intervalo do tempo de pausa em zero, esse modelo se comporta de forma semelhante ao modelo de mobilidade aleatória.

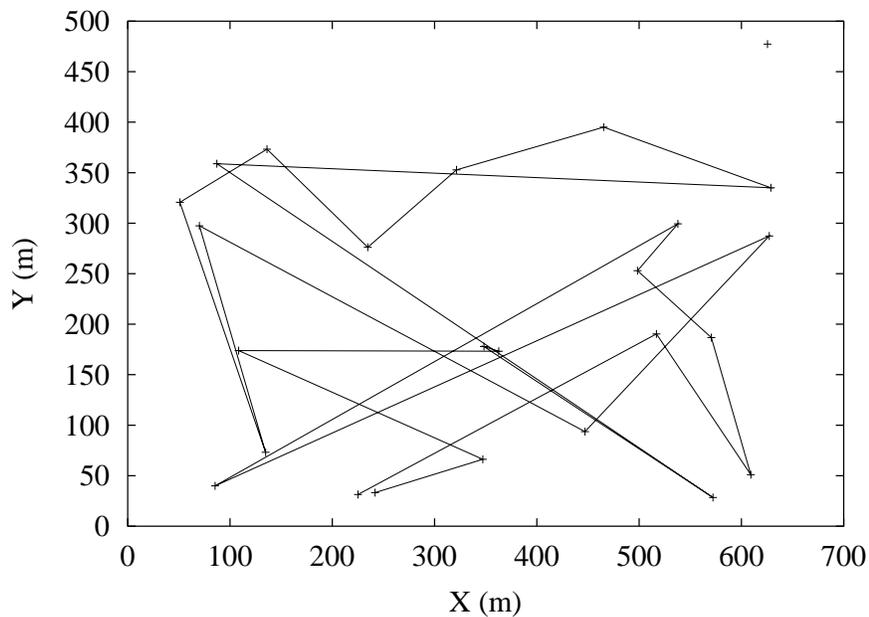


Figura 2.2: Percurso de um NM usando o *waypoint*.

Com as características descritas acima e como pode ser visto na figura 2.2, o modelo *waypoint* também é sem memória, e com isso ele possui as mesmas desvantagens do modelo aleatório. Trabalhos como, [25, 26, 27, 28, 29, 30], mostram que o *waypoint* apresenta características indesejáveis, evidenciando o seu comportamento não realístico. Entretanto, ele é um dos modelos de mobilidade mais usados pelos pesquisadores devido à sua simplicidade de implementação e configuração.

Modelo Markoviano de Percurso Aleatório - MPA

O modelo markoviano de percurso aleatório foi proposto por Chiang em [31]. Nesse modelo, o movimento é modelado através de duas cadeias de Markov ¹: uma para representar a coordenada x e outra para a coordenada y . Dessa maneira, ele é um modelo de mobilidade com memória, pois, o movimento do NM no estado atual depende do último movimento representado. Essa é uma característica desejada para representar a movimentação de pessoas e veículos.

Esse modelo possui três estados para representar as coordenadas x e y . O estado zero (0) representa a posição atual do NM em x e em y , o estado um (1) representa a posição anterior do NM em x e em y , e o estado dois (2) representa a próxima posição do NM também em x e em y , conforme mostrado na figura 2.3. O modelo utiliza a matriz de probabilidade de transição P , descrita a seguir, para determinar a posição de um NM específico no próximo instante de tempo t .

$$P = \begin{bmatrix} P(0,0) & P(0,1) & P(0,2) \\ P(1,0) & P(1,1) & P(1,2) \\ P(2,0) & P(2,1) & P(2,2) \end{bmatrix}$$

Nessa matriz, cada elemento $P(a,b)$ representa a probabilidade de mudança do estado a para o estado b . Em [31] são usados os seguintes valores (matriz P_{MPA}) para a transição de estados e que são ilustrados também na figura 2.3.

$$P_{MPA} = \begin{bmatrix} 0 & 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,7 & 0 \\ 0,3 & 0 & 0,7 \end{bmatrix}$$

Nesse modelo, a probabilidade de transição do estado (0) para ele mesmo é igual a zero, ou seja, $P(0,0) = 0$. Com isso, não é possível movimentar-se para as direções

¹Cadeia de Markov [32] é representada através de um conjunto de estados que uma variável pode assumir com o tempo t , assim como as probabilidades de transição entre os estados. Nessa cadeia, a representação atual do sistema depende apenas do estado anterior, cujo tempo era $t - 1$.

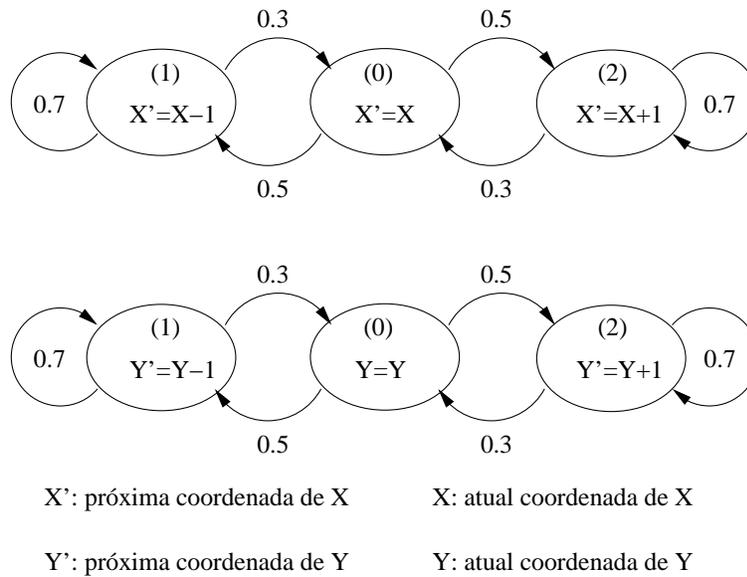


Figura 2.3: Diagramas de transições de estado do modelo MPA.

vertical e horizontal, ou ficar parado em uma posição qualquer. Dessa forma, os NMs têm a possibilidade de movimentação somente nas diagonais. Além disso, a probabilidade do movimento continuar na mesma direção é maior que a de mudar de direção, fazendo com que o NM, uma vez em movimento em uma direção, tenda a permanecer na mesma direção.

Outra característica desse modelo é que ele não permite mudanças bruscas de sentido no movimento, pois para o NM mudar o sentido é necessário parar o movimento, passando pelo estado (0), para depois mudar de sentido. Essas características mostram que esse modelo é mais realístico que os modelos: percurso aleatório e *waypoint*, embora, não permite acelerações na mesma direção.

Modelo de Mobilidade *Smooth Random*

O modelo de mobilidade *smooth random*, proposto por Bettstetter em [1], também é uma extensão do modelo aleatório. Neste modelo, são definidos dois processos de Poisson para permitir a mudança de direção e de velocidade dos NMs.

A principal contribuição desse modelo é permitir uma mudança suave na veloci-

dade evitando paradas abruptas e acelerações bruscas no movimento, como ilustrado na figura 2.4. Nessa figura é visualizada a ocorrência de uma desaceleração no movimento antes de proceder uma mudança de direção e logo após essa mudança de direção, o movimento volta a ser acelerado até atingir a velocidade alvo. Entretanto, o modelo *smooth* não evita mudanças bruscas de direção.

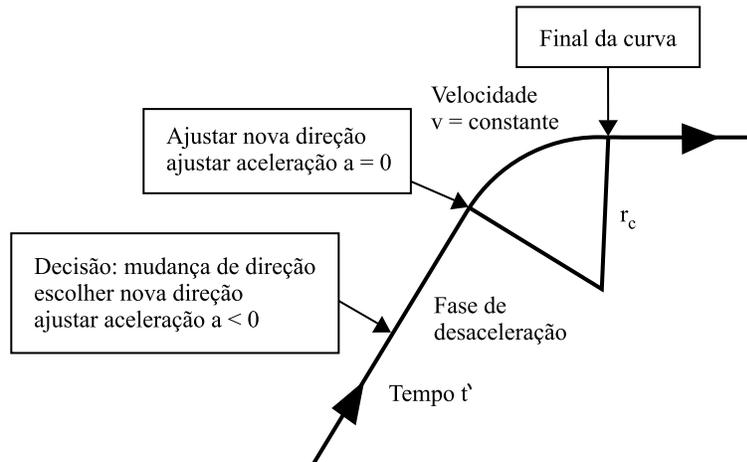


Figura 2.4: Comportamento de desaceleração antes de uma mudança de direção no modelo *smooth random* [1]

Existem outros modelos de mobilidade individual propostos na literatura que não são muito utilizados. Em [5], é apresentado um modelo com uma área de simulação sem fronteira. No trabalho [2], é descrito o modelo de mobilidade *Gauss-Markov* que apresenta um comportamento mais realístico que os modelos aleatório e *waypoint*, contudo, possui uma modelagem complexa e uma difícil configuração dos parâmetros. O modelo de mobilidade *City Section* é proposto em [5], onde busca-se representar a movimentação de NMs numa área urbana. Atualmente, têm sido propostos novos modelos para comportamentos específicos, como em [33, 34].

2.2.2 Modelos de Mobilidade em Grupo

Os modelos de mobilidade em grupo são modelos que representam o movimento de um grupo de NMs, onde o comportamento de movimentação dos NMs é dependente, tanto em relação a intervalos de tempo quanto ao relacionamento entre eles

pela velocidade, direção e tipo do NM. Devido a essas características, o desenvolvimento da modelagem de uma movimentação em grupo é complexo e torna-se de difícil implementação, visto que existe uma grande correlação dos componentes da movimentação (velocidade, direção e tipo do NM) dos NMs do grupo.

Esses modelos são utilizados na predição da disponibilidade do enlace sem fio e, recentemente, estão sendo utilizados também na predição do particionamento das redes móveis *ad hoc*, que são mudanças de escala global na topologia da rede [18]. A principal causa desse particionamento é o próprio comportamento de movimentação em grupo dos NMs.

Nas seções abaixo serão descritos os principais modelos de mobilidade em grupo: modelo de mobilidade em grupo baseado num ponto de referência e modelo de mobilidade em grupo baseado numa velocidade de referência.

Modelo de Mobilidade em Grupo com Ponto de Referência - MMGPR

Esse modelo foi desenvolvido por Hong *et al.* em [2]. Nele cada grupo tem um centro de referência lógico. O movimento do centro define o comportamento de todo o grupo incluindo localização, velocidade, direção, aceleração etc. Desse modo, a trajetória do grupo é composta por um caminho até o centro, e os NMs são distribuídos uniformemente dentro da área geográfica do grupo. Para cada NM, é atribuído um ponto de referência (PR), aos quais, segue o movimento do grupo. Um NM é colocado aleatoriamente na vizinhança do ponto de referência. O esquema de referência num ponto admite o comportamento de movimentação aleatória independente para cada NM, além do movimento do grupo.

Na figura 2.5 é ilustrado o MMGPR com dois grupos. Cada grupo tem um vetor de movimentação de grupo \vec{V}_{gi} . Na movimentação do NM A , o ponto de referência move de $PR(\tau)$ para $PR(\tau + 1)$ com o vetor de movimentação do grupo $\vec{MG} = \vec{V}_{g1}$. Então, a nova posição do NM é gerada adicionando o vetor de movimentação aleatória \vec{MA} para o novo ponto de referência $PR(\tau + 1)$. Esse vetor tem o comprimento seguindo uma distribuição uniforme dentro de um certo raio centrado no ponto de

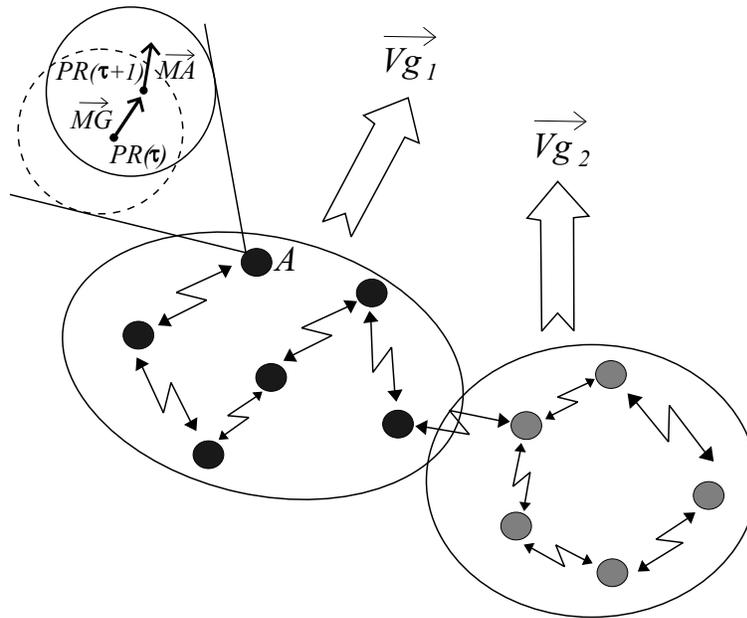


Figura 2.5: Modelo MGPR [2].

referência e a direção distribuída uniformemente entre 0 e 360°. Além disso, o vetor é independente da localização anterior do nó. Como visto na seção 2.2.1, essa representação não é adequada gerando um comportamento não realístico pelo modelo.

O MMGPR define o movimento de grupo explicitamente, dando um caminho do movimento para cada grupo. Esse caminho será dado definindo uma seqüência de pontos de verificação (*checkpoints*) ao longo da trajetória correspondendo a um intervalo de tempo. Em cada tempo, o centro do grupo procura um novo *checkpoint* e calcula o novo vetor de movimentação de grupo \vec{V}_{gi} , o próximo local do *checkpoint* e seu intervalo de tempo.

Esse modelo é usado nas seguintes aplicações:

- Grupos em diferentes áreas executando a mesma tarefa, como em campos de batalha ou em recuperação de desastres. Nesses cenários, os grupos têm o mesmo vetor de movimentação \vec{V}_{gi} ;
- Diferentes grupos executando tarefas diferentes sobre a mesma área, ou seja, grupos com padrões de mobilidade diferentes na mesma região, onde cada grupo possui um vetor de movimentação \vec{V}_{gi} distinto.

Dentro desse contexto, foram definidos três cenários em que se utiliza esse modelo [2]: conferência, convenção, busca e salvamento.

Modelo de Mobilidade em Grupo baseado numa Velocidade de Referência - MMGVR

Em [18], é proposta uma extensão do modelo MMGPR [2], denominada de Modelo de Mobilidade em Grupo baseado numa Velocidade de Referência - MMGVR. Nesse modelo é proposto um comportamento de movimentação em grupo baseado numa velocidade média. Dessa forma, os nós que possuem uma velocidade média aproximada serão enquadrados em um mesmo grupo.

Existem outros modelos que representam movimentos em grupo. Como exemplo, em [35] são propostos vários comportamentos de movimentação em grupo de movimentação.

2.3 Regras de Borda para Simulação de Áreas Limitadas

A observação do comportamento de movimentação dos NMs é feita necessariamente dentro de uma determinada área, que pode ser, tanto em ambientes abertos (rodovias, deslocamento terrestre de tropas militares, deslocamento de veículos e pessoas numa cidade ou em centros comerciais), quanto em ambientes fechados (*shoppings*, prédios ou salas). Para representar a mobilidade dos NMs em cenários simulados, também é utilizada uma área limitada. O limite dessa área é denominado de borda ou fronteira. Dessa maneira, quando um NM atinge a borda de simulação, é necessário decidir o que fazer com o movimento desse NM. Esse processo é chamado de regra de borda.

Na literatura, existem várias regras de borda [1]. A seguir serão descritas as principais regras de borda: *bounce*, *delete and replace*, e *wrap around*.

2.3.1 *Bounce*

A regra de borda *bounce*, apresentada em [1, 36], é definida como sendo uma reflexão do movimento do NM na borda da área de simulação (tendo como forma geométrica um retângulo qualquer), fazendo com que a nova trajetória do NM permaneça dentro da área de simulação. Esse novo movimento é caracterizado por dois componentes, o ângulo da direção β e a velocidade v , como pode ser visto na figura 2.6. O novo valor do ângulo será $-\beta$ nas bordas da área de simulação. O valor da velocidade v permanecerá o mesmo de antes da reflexão.

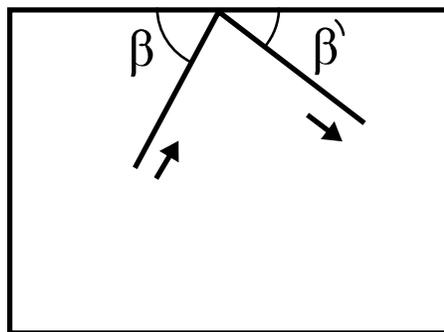


Figura 2.6: Regra de borda *bounce*

Existem algumas extensões dessa regra, como a apresentada em [1], onde o novo valor de β é uniformemente distribuído entre $[0, 180^\circ]$ nas bordas superior, inferior e laterais, e $[0, 90^\circ]$ nos cantos da área de simulação. O valor da velocidade v também segue uma distribuição uniforme entre $[vmin, vmax]$.

2.3.2 *Delete and Replace*

A regra de borda *delete and replace*, descrita em [1], busca representar um cenário onde os NMs podem atravessar a fronteira da área de simulação, como acontece em muitas situações reais (movimentação de veículos em estradas e rodovias, entrada e saída de pessoas de uma sala, prédio ou *shopping*).

Nessa regra é definido que quando um NM atinge a borda, este é retirado da

borda da simulação e inserido de novo, aleatoriamente, dentro da área simulada, com um novo ângulo de direção α' , como pode ser visto na figura 2.7.

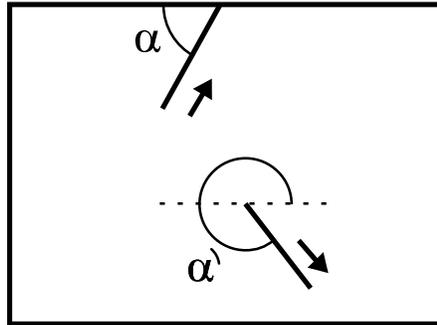


Figura 2.7: Regra de borda *delete and replace*

Essa regra tem a característica de representar a saída do NM da área de simulação, que as vezes é uma característica realística. Entretanto, essa regra possui uma característica não realística que é colocar o mesmo NM aleatoriamente numa posição qualquer da área, para evitar que o cenário fique sem nós durante a simulação.

2.3.3 *Wrap around*

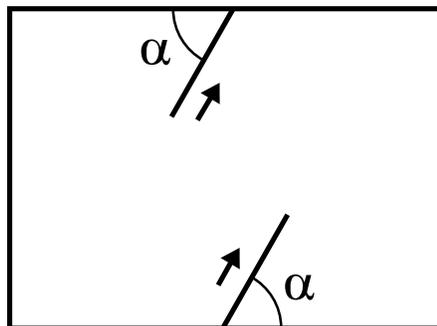


Figura 2.8: Regra de Borda *Wrap around*

A regra de borda *wrap around*, também apresentada em [1], utiliza o mecanismo de espelhamento do movimento do NM na borda oposta à fronteira alcançada. Esse espelhamento do movimento preserva a mesma direção α e velocidade v do NM no momento de alcance à borda, conforme ilustrado na figura 2.8.

Dentro desse contexto, devem haver critérios para a escolha da regra de borda e cuidados devem ser tomados na sua utilização, pois essas regras influenciam a avaliação do desempenho de sistemas e aplicações simuladas.

Capítulo 3

Propostas de Modelos de Mobilidade Individual

NESSE capítulo são propostos dois modelos de mobilidade individual que buscam tratar os problemas apresentados na seção 2.2.1. Esses modelos são indicados para representar a movimentação dos NMs tanto em ambientes fechados, como em salas e prédios, quanto em ambientes abertos, como áreas urbanas e rodovias. Sendo assim, a seção 3.1 apresenta uma caracterização geral da utilização dos processos markovianos na representação do movimento dos usuários. Na seção 3.2, será descrito um modelo simples de mobilidade através de suas características, de sua modelagem analítica e da geração de alguns comportamentos específicos de movimentação. Em seguida, na seção 3.3, um modelo mais genérico será apresentado também através de sua modelagem analítica e de alguns comportamentos específicos de movimentação. Por fim, será mostrada uma avaliação dos modelos propostos na seção 3.4. Nessa avaliação, as métricas de desempenho utilizadas, o ambiente de simulação e os resultados obtidos serão descritos detalhadamente.

3.1 Visão Geral

Como apresentado no capítulo 2, a representação da movimentação dos usuários

é importante e necessária para uma análise preliminar do comportamento das aplicações e sub-sistemas utilizados em redes móveis *ad hoc*. Essa representação possibilita um estudo detalhado e minucioso dessas redes, antes mesmo de sua implementação real.

Dentro desse contexto, os processos markovianos [32, 37], os quais são um dos tipos de processos estocásticos¹, se destacam e serão utilizados nesse trabalho. Nos processos markovianos, o comportamento do sistema, no próximo intervalo de tempo ($t + 1$), depende apenas do seu estado atual, cujo tempo é (t), ou seja, o estado atual do modelo (representado por um processo markoviano) fornece todas as informações necessárias sobre o sistema.

Essa característica é adequada para ser utilizada na representação do movimento dos NMs, visto que na maioria das vezes, os usuários movimentam-se com uma certa tendência de permanecer na mesma direção ou em direções próximas. Isso quer dizer que, os usuários se movimentam com um senso de direção e não aleatoriamente [5].

Além disso, pode-se caracterizar a modelagem proposta a partir do *framework* de Bettstetter [1], onde a modelagem possui uma abordagem aleatória no nível de aleatoriedade para mudança de direção e de velocidade contendo valores probabilísticos distribuídos não uniformemente. A modelagem pode representar várias dimensões ($1D$, $2D$ e $3D$), porém, quanto ao nível de detalhamento, pode ser utilizada somente para representar movimentos individuais, tanto no contexto da micromobilidade, quanto na macromobilidade. E na escolha da direção, pode-se utilizar todas as regras de borda contidas no *framework*.

Os modelos propostos se baseiam em [31], sendo também processos markovianos [32, 37] e serão descritos em detalhes nas seções que se seguem.

¹Processo estocástico [32, 37], é um conjunto de variáveis aleatórias indexadas por um parâmetro de tempo. Sendo assim, em um processo estocástico $\{X(t) : t \geq 0\}$, o índice t é interpretado como tempo e $X(t)$ corresponde ao estado do processo no instante t .

3.2 Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Simples - MMIS

Como foi descrito na seção 2.2.1, o modelo de mobilidade MPA tenta descrever um movimento com o comportamento mais realístico que os modelos de mobilidade aleatória e *waypoint*. Entretanto, o MPA não permite movimentos na vertical e horizontal, ficar parado numa posição qualquer e mudanças de velocidade na mesma direção.

Dentro desse contexto, é proposta uma extensão do modelo MPA que suporta tais características. Esta extensão é denominada Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Simples - MMIS. Nas próximas seções serão descritas a modelagem analítica e a geração de perfis de mobilidade desse modelo.

3.2.1 Modelagem Analítica

O modelo MMIS usa uma cadeia de Markov com parâmetro de tempo discreto para representar o movimento na coordenada x , e uma outra cadeia para a coordenada y , como pode ser visto na figura 3.1. Nessas cadeias, a probabilidade de transição do estado (0) para os outros estados é definida pela variável p , e a transição dos estados (1) e (2) para o estado (0) é dada pela variável q . Dessa forma, a matriz de probabilidade de transição de estados P_{MMIS} do modelo MMIS é definida a seguir:

$$P_{MMIS} = \begin{bmatrix} 1 - 2p & p & p \\ q & 1 - q & 0 \\ q & 0 & 1 - q \end{bmatrix}$$

Na figura 3.1 são mostrados os diagramas de transições de estado do modelo MMIS. Como pode ser observado, o modelo apresenta uma nova característica que é permitir a transição do estado (0) para o próprio estado (0) com uma probabilidade

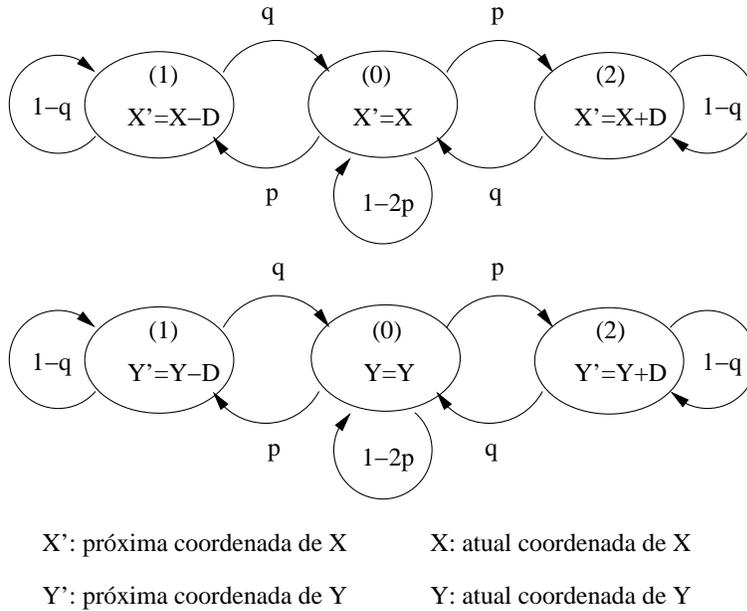


Figura 3.1: Diagramas de transições de estado do modelo MMIS.

de $1 - 2p$, possibilitando que o NM permaneça na mesma posição de x ou y em um ou mais instantes de tempo. Dessa forma, o modelo permite ainda que o NM fique parado, ou seja, a posição de x e y permanece a mesma em um ou mais instantes de tempo. Já a permanência no estado (1) ou (2) é dada pela probabilidade $1 - q$.

Para facilitar a visualização do funcionamento e a implementação do modelo é apresentada na figura 3.2 uma cadeia de Markov contendo duas variáveis de estado, representando a posição do NM nas coordenadas x e y . As transições de cada estado representam o deslocamento nos eixos x e y , como pode ser visto na matriz de probabilidade P_{xy} . Esse deslocamento é representado pelo incremento ou decremento nas posições X' e Y' pela variável D . Dessa forma, as velocidades alcançadas através desse modelo, são D e $D\sqrt{2}$ unidades (onde, a variável $D \in \mathbb{R}$ e a unidade da velocidade pode ser m/s , km/h ou qualquer outra medida desejada).

De acordo com essa característica, o modelo MMIS pode representar movimentos com apenas dois valores de velocidade, sendo assim indicado para cenários de pequena variação de velocidade, tais como: movimentação de pessoas, algumas redes *Bluetooth* que possuam mobilidade e redes de sensores [4] com mobilidade restrita.

Neste caso, se o valor de p for muito grande, o modelo possibilitará uma pequena movimentação nessas direções. Além disso, quanto maior for o valor de q , menor ainda será a movimentação nessas direções.

3. Já a probabilidade de permanecer movimentando-se nas diagonais em mais de um instante de tempo é dada pela fórmula $(1-q)^2$. Sendo assim, quanto menor for o valor de q (próximo de zero), maior será a possibilidade de movimentação nessas direções.

Como foi descrito nas características acima, variando-se o valor das variáveis p e q , entre $[0,1]$, têm-se uma variedade de comportamentos gerados pelo modelo MMIS, caracterizando-o assim, como um modelo parametrizável e adaptativo à situações específicas. Com isso, este modelo permitirá a geração de diversos perfis de movimentação dos nós de uma rede. Esses perfis serão detalhados na próxima seção.

3.2.2 Perfis de Mobilidade

O perfil de mobilidade pode ser definido como sendo um subconjunto de valores atribuídos em cada característica e na correlação dessas na movimentação do NM seguindo um modelo de mobilidade numa determinada área de simulação. Com isso, cada perfil de mobilidade representa um comportamento específico de movimentação.

Como características da movimentação de um NM têm-se: a variação da velocidade, o comportamento das mudanças de direção, o número de paradas no movimento, o intervalo do tempo de pausa e a dependência da movimentação do NM com os outros membros da rede. Com isso, variando-se o valor de cada característica, tem-se um perfil de mobilidade específico.

Dentro desse contexto, a utilização de diferentes matrizes de probabilidade de transição permitirão a geração de diversos perfis de mobilidade. Para isso, basta atribuir diferentes valores para as variáveis p e q , que serão obtidos perfis de mobilidade específicos, como alguns mostrados a seguir. Além disso, para gerar a movimentação

dos perfis de mobilidade, o incremento D recebeu o valor um e o tempo de transição entre estados é igual a um segundo, fazendo com que as velocidades obtidas são $1m/s$ ou $1,41m/s$. Como foi descrito na seção 3.2.1, o incremento D pode ser modificado.

Perfil de Mobilidade MMISa

O perfil de mobilidade MMISa é definido pelo ajuste das variáveis p e q nos valores: 0,4 e 0,3, respectivamente. Com esses valores, a matriz P_{xy} se transforma na matriz P_{MMISa} , mostrada a seguir.

$$P_{MMISa} = \begin{bmatrix} 0,04 & 0,08 & 0,08 & 0,08 & 0,08 & 0,16 & 0,16 & 0,16 & 0,16 \\ 0,06 & 0,14 & 0 & 0,12 & 0,12 & 0,28 & 0 & 0,28 & 0 \\ 0,06 & 0 & 0,14 & 0,12 & 0,12 & 0 & 0,28 & 0 & 0,28 \\ 0,06 & 0,12 & 0,12 & 0,14 & 0 & 0,28 & 0,28 & 0 & 0 \\ 0,06 & 0,12 & 0,12 & 0 & 0,14 & 0 & 0 & 0,28 & 0,28 \\ 0,09 & 0,21 & 0 & 0,21 & 0 & 0,49 & 0 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0 & 0,21 & 0,21 & 0 & 0 & 0,49 & 0 & 0 \\ 0,09 & 0,21 & 0 & 0 & 0,21 & 0 & 0 & 0,49 & 0 \\ 0,09 & 0 & 0,21 & 0 & 0,21 & 0 & 0 & 0 & 0,49 \end{bmatrix}$$

Com isso, o perfil MMISa é gerado pelo diagrama de transições de estado descrito na figura 3.3.

A partir de P_{MMISa} ou do diagrama dessa figura, observa-se as seguintes características do perfil MMISa:

1. A probabilidade de um NM ficar parado em mais de um instante de tempo, $(1 - 2p)^2$, é igual a 0,04, a qual é considerada muito pequena se comparada com as demais probabilidades, gerando raras paradas no movimento.
2. A probabilidade de um NM permanecer movimentando-se na vertical ou na horizontal em mais de um instante de tempo, $(1 - 2p)(1 - q)$, é igual a 0,14. Isso representa uma pequena movimentação na vertical ou na horizontal.

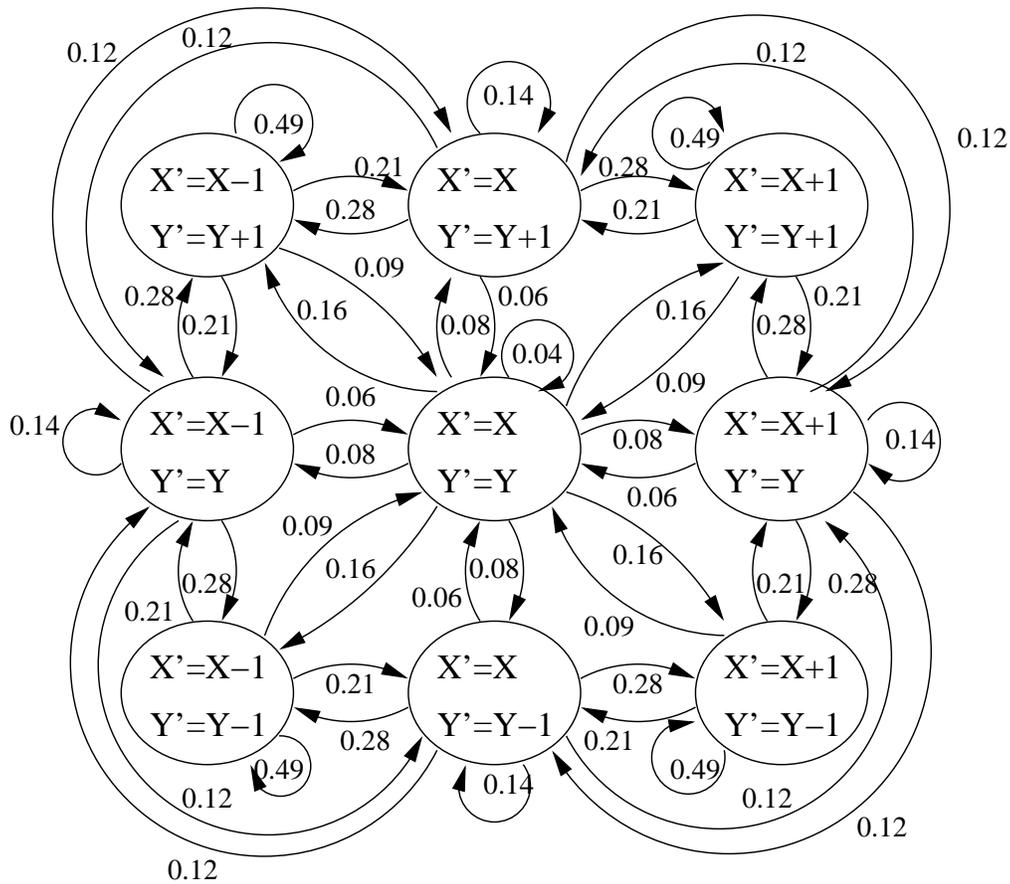


Figura 3.3: Diagrama de transições de estado do perfil de mobilidade MMISa.

3. A probabilidade de permanecer movimentando-se nas diagonais em mais de um instante de tempo $(1 - q)^2$ com o valor de 0,49 é, comparativamente, alta. Assim, essa probabilidade provoca uma grande movimentação nessas direções.

Com essas características, o perfil MMISa representa uma intensa movimentação nas diagonais, pouca movimentação na horizontal e na vertical e raríssimas paradas, conforme é ilustrado, pelo percurso de movimentação de dois nós na figura 3.4. Esse perfil pode representar a movimentação de pessoas em áreas irregulares com raríssimas paradas, como a movimentação de soldados em uma floresta.

Perfil de Mobilidade MMISb

O perfil MMISb é definido por $p = 0,4$ e $q = 0,15$. A partir desses valores,

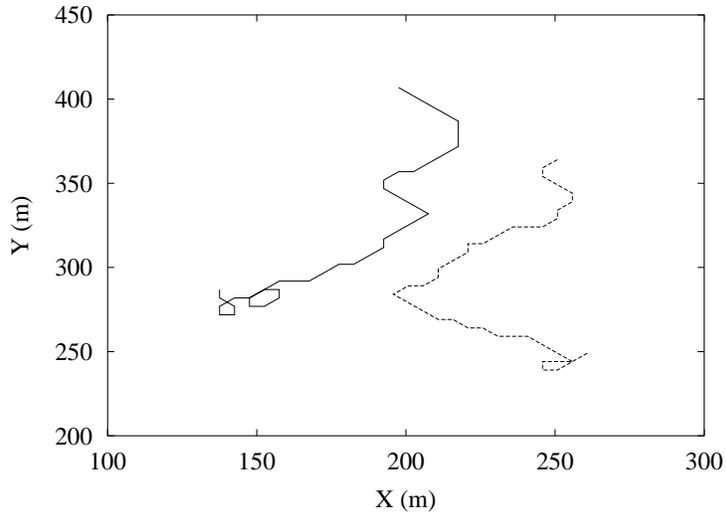


Figura 3.4: Percurso de dois nós seguindo o perfil de mobilidade MMISa.

observa-se as seguintes características do perfil MMISb:

1. A probabilidade de um NM ficar parado em mais de um instante de tempo, também é igual a 0,04, assim, possibilitando raras paradas no movimento.
2. A probabilidade de um NM permanecer movimentando-se na vertical ou na horizontal em mais de um instante de tempo, é igual a 0,17. Isso representa uma pequena movimentação nessas direções.
3. A probabilidade de permanecer movimentando-se nas diagonais em mais de um instante de tempo com o valor de 0,72 é, comparativamente, muito alta. Assim, provocando uma movimentação muito grande nessas direções.

Com essas características, o perfil MMISb apresenta um comportamento semelhante ao perfil MMISa, porém, com uma movimentação muito grande nas diagonais. Esse comportamento é evidenciado pelo percurso de movimentação de vários nós na figura 3.5 e que pode representar, de maneira muito próxima, a movimentação de pessoas em áreas urbanas com quarteirões quadrados ou retangulares, como por exemplo, a ilha de Manhattan em Nova York.

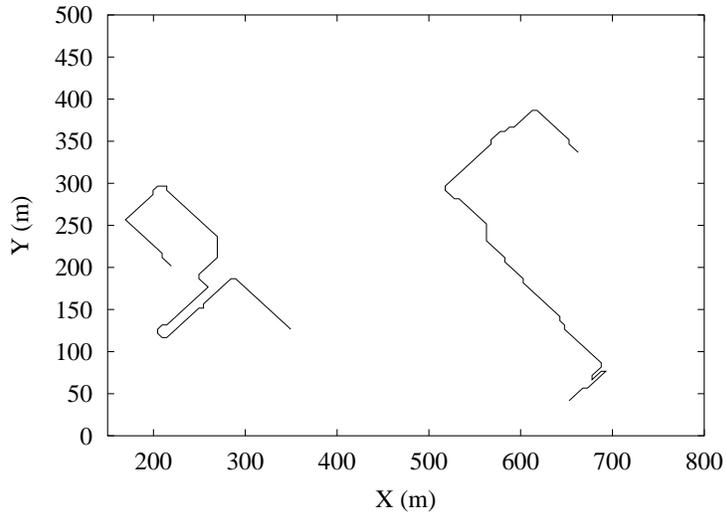


Figura 3.5: Percurso dos nós seguindo o perfil MMISb

Perfil de Mobilidade MMISc

O perfil MMISc é definido por $p = 0,05$ e $q = 0,2$. A partir desses valores, evidencia-se as seguintes características do perfil MMISc:

1. A probabilidade de um NM ficar parado em mais de um instante de tempo é igual a 0,81, possibilitando grandes intervalos de pausa no movimento.
2. A probabilidade de um NM permanecer movimentando-se na vertical ou na horizontal em mais de um instante de tempo, é igual a 0,72. Isso representa uma intensa movimentação nessas direções.
3. A probabilidade de permanecer movimentando-se nas diagonais em mais de um instante de tempo com o valor de 0,64. Assim, provocando uma freqüente movimentação nessas direções.

Com essas características, o perfil de mobilidade MMISc apresenta várias paradas e com uma grande possibilidade de permanecer parado em instantes de tempo consecutivos. Além disso, há uma freqüente movimentação em todas as direções. Entretanto, como pode ser visto na figura 3.6, a movimentação é bastante curvilínea, irregular e com muitas paradas, caracterizando um pequeno deslocamento durante

o tempo de simulação. Esse tipo de perfil pode representar situações de desastre, onde os NMs possuem movimentos irregulares e ficam muito tempo parados.

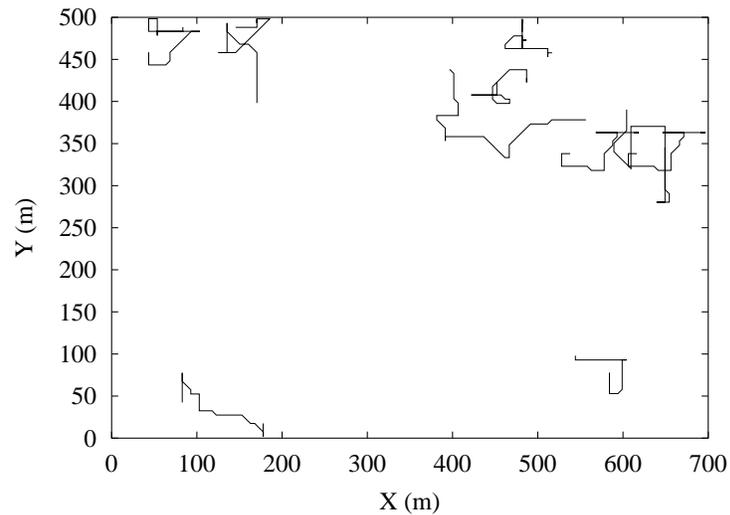


Figura 3.6: Percurso de vários nós seguindo o perfil MMISc

Perfil de Mobilidade MMISd

O perfil de mobilidade MMISd é definido por $p = 0,05$ e $q = 0,05$. A partir desses valores, observa-se as seguintes características desse perfil:

1. A probabilidade de um NM ficar parado em mais de um instante de tempo é igual a 0,81, possibilitando poucas paradas, mas, com grandes intervalos de pausa no movimento.
2. A probabilidade de um NM permanecer movimentando-se na vertical ou na horizontal em mais de um instante de tempo, é igual a 0,86. Isso representa uma intensa movimentação nessas direções.
3. A probabilidade de permanecer movimentando-se nas diagonais em mais de um instante de tempo com o valor de 0,90. Assim, provocando uma alta movimentação nessas direções.

Com essas características, o perfil de mobilidade MMISd apresenta raras paradas devido a transição para o estado (0) ser igual a 0,05, mas, com grandes possibilidades de permanecer parado por muitos instantes de tempo. Além disso, há uma elevada movimentação em todas as direções, principalmente nas diagonais, caracterizando movimentos retilíneos como em algumas regiões urbanas e em rodovias. Esse comportamento pode ser visto na figura 3.7.

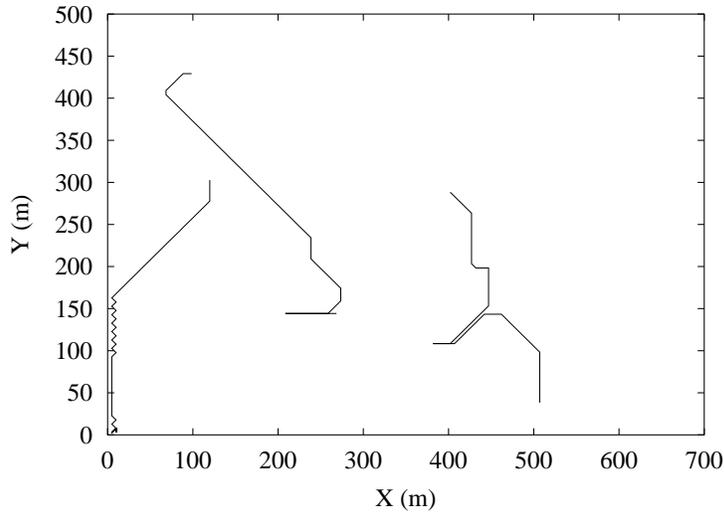


Figura 3.7: Percurso de vários nós seguindo o perfil MMISd

Como foi apresentado na seção 3.2.1, o modelo MMIS permite movimentos na vertical e horizontal, além de paradas no movimento dos NMs durante um ou mais intervalos de tempo. Além disso, com o ajuste dos parâmetros p e q , o modelo gera diversos perfis de mobilidade distintos fazendo com que sejam representados vários cenários de mobilidade, conforme descrito na seção 3.2.2. Entretanto, o modelo MMIS não possibilita variações da velocidade na mesma direção. Em função disso, na próxima seção será apresentado um modelo markoviano que possibilita essas variações.

3.3 Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico - MMIG

Na maioria dos cenários em que se utiliza uma rede móvel *ad hoc*, os NMs movimentam-se variando a velocidade. Para representar esses cenários, é proposto nesta seção um modelo markoviano que suporta várias velocidades, denominado Modelo Markoviano de Mobilidade Individual Genérico - MMIG.

Esse modelo é uma generalização do modelo MMIS, herdando todas as suas características. Além disso, o modelo MMIG permite desde uma movimentação suave com uma pequena variação na velocidade, como por exemplo o movimento de pessoas, até grandes acelerações e/ou desacelerações no movimento, como no caso do movimento de veículos. Essa grande capacidade de variações na representação do movimento é devido ao ajuste dos três parâmetros de configuração do modelo, definidos a seguir:

- $m \rightarrow$ é o valor que representa o somatório de todas as probabilidades de transição do estado inicial para os estados a sua direita. Esse valor também representa o somatório de todas as probabilidades de transição para os estados à esquerda.
- $n \rightarrow$ é o número máximo de incremento de passos no deslocamento do NM durante o instante de tempo de uma transição de estado.
- $b \rightarrow$ é a base do número que representa o deslocamento do NM durante o instante de tempo de uma transição de estado.

Nas seções abaixo serão descritas a modelagem analítica e a geração de perfis de mobilidade do modelo MMIG.

3.3.1 Modelagem Analítica

Como no modelo MMIS, o modelo MMIG também utiliza uma cadeia de Mar-

kov para representar o deslocamento na coordenada x e um outra cadeia para a coordenada y . Essas cadeias serão descritas em detalhe nesta seção. Nesse modelo é atribuído um conjunto de valores do incremento na posição inicial do NM, que variará entre $[1, n]$, ou seja, o incremento corresponde à velocidade que o NM usa para mudar da posição atual que é X para a próxima posição que é X' . Esse incremento, que representa a variação do valor da velocidade, segue o comportamento de uma série geométrica onde o valor inicial é 1, o valor máximo é n e a variável b é definida como a base do incremento, tendo assim:

$n \rightarrow$ é o limite superior do incremento de passos, onde,

$$\frac{1}{n} > 0, \quad 0 < n < \infty \quad | \quad n \in \mathbb{R} \quad \text{e} \quad \text{é potência de } b \quad (3.1)$$

então,

$$n = b^{\log_b n}, \quad b \in \mathbb{R} \quad (3.2)$$

A próxima posição do NM é calculada da seguinte forma:

$$X' = X + s \cdot b^v, \quad 0 \leq v \leq \log_b n, \quad s = \{-1, 0, 1\}, \quad v \in \mathbb{Z} \quad (3.3)$$

Onde s representa o sentido do movimento com os valores de -1 para o sentido oposto ao da posição anterior, 0 para representar que o NM está na mesma posição e 1 representando o mesmo sentido de movimento do NM na posição anterior. O valor v representa o expoente do incremento dado à próxima posição do NM e é igual ao módulo do índice de identificação do estado (i) menos uma unidade, ou seja, $v = |i| - 1$ com exceção do estado (0) .

Depois de definidas as variáveis usadas para modificar a posição do NM ou a velocidade utilizada, descritas nas equações (3.1), (3.2), (3.3), serão abordados os valores das probabilidades de transição de estado do modelo MMIG. Cada estado das cadeias da figura 3.8, com exceção dos estados $(-e, e)$, terá os seguintes valores de probabilidade de transição:

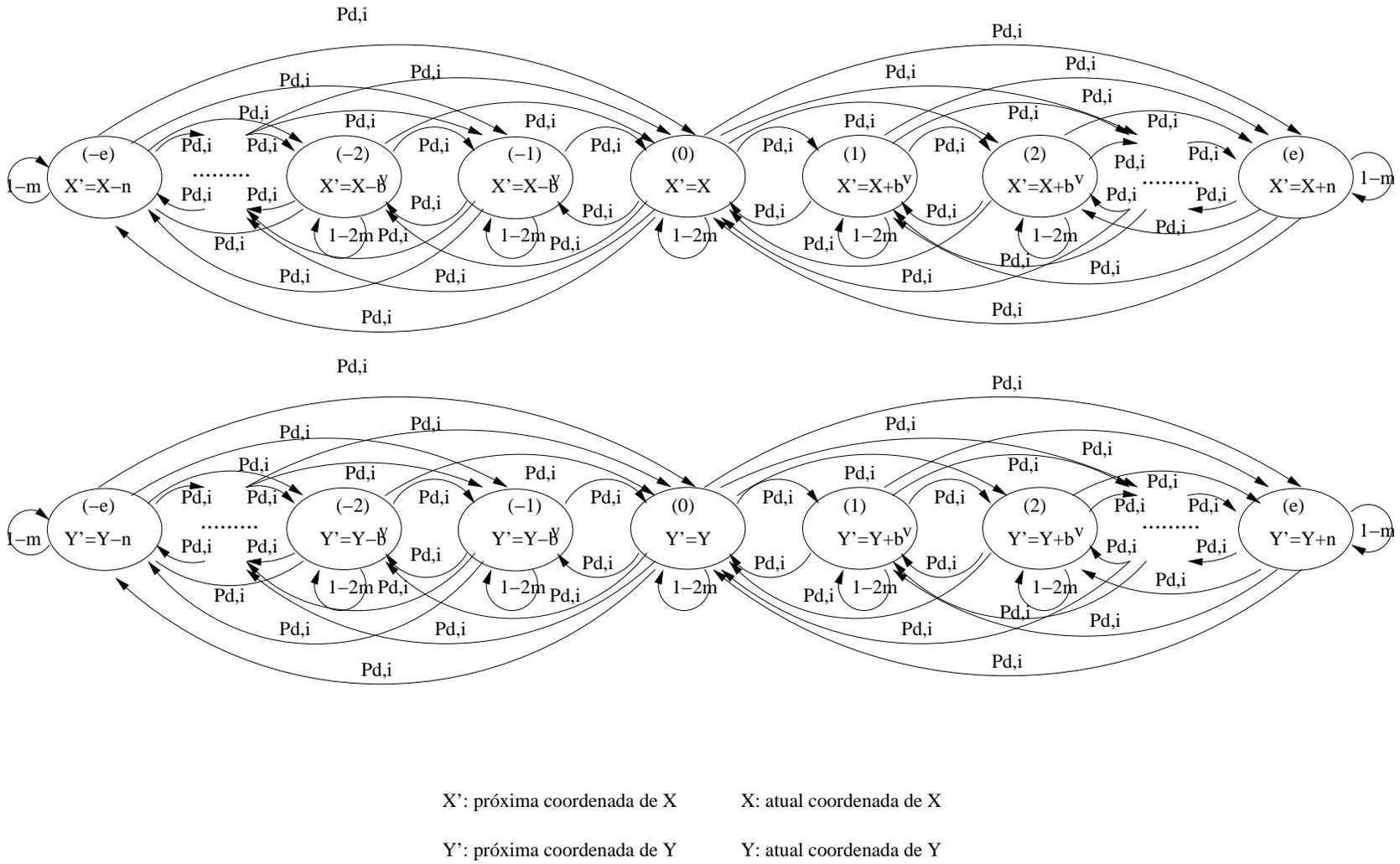


Figura 3.8: Diagrama de transição de estado do modelo MMIG

- Para permanecer no estado atual o valor é igual a $1 - 2m$, conforme definido na equação (3.4);
- A soma de todas as probabilidades de mudança para qualquer estado à direita do estado atual é igual a m , conforme ilustrado na figura 3.8. Esse valor está definido na equação (3.5) para o estado (0), na equação (3.6) para os estados positivos e na equação (3.7) para os estados negativos;
- A soma de todas as probabilidades de mudança para qualquer estado à esquerda também é igual a m , conforme ilustrado na figura 3.8. Esse valor está definido na equação (3.5) para o estado (0), na equação (3.6) para os estados negativos e na equação (3.7) para os estados positivos.

$$P(X'(t) = X(t) + s \cdot b^v | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot b^v) = 1 - 2m \quad (3.4)$$

$$0 \leq v < \log_b n, \quad -1 \leq s \leq 1$$

$$\sum_{v=0}^{\log_b n} P(X'(t) = X(t) + s \cdot b^v | X'(t-1) = X(t-1)) = m \quad s = \{-1, 1\} \quad (3.5)$$

$$\sum_{v=k+1}^{\log_b n} P(X'(t) = X(t) + s \cdot b^v | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot b^k) = m \quad (3.6)$$

$$0 < k \leq \log_b n, \quad s = \{-1, 1\}, \quad k \in \mathbb{Z}$$

$$\left(\sum_{v=0}^{k-1} P(X'(t) = X(t) + s \cdot b^v | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot b^k) \right) + (P(X'(t) = X(t) | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot b^k)) = m, \quad 0 < k < \log_b n, \quad s = \{-1, 1\} \quad (3.7)$$

Como os estados $(-e, e)$ são as extremidades do modelo MMIG, mostrados na figura 3.8, eles possuem uma diferença em relação aos outros estados. O estado

($-e$) só possui a possibilidade de mudar para um outro estado a sua direita, onde a soma de todos os possíveis valores probabilísticos é igual a m , conforme definido na equação (3.7) ou permanecer nele mesmo com valor probabilístico de $1 - m$, conforme a equação (3.8). De forma simétrica, o estado (e) só possui a possibilidade de mudar para um outro estado a sua esquerda, onde a soma de todos os possíveis valores probabilísticos também é igual a m , conforme definido na equação (3.7) ou pode permanecer nele mesmo com probabilidade igual a $1 - m$, como definido na equação (3.8).

$$P(X'(t) = X(t) + s \cdot n | X'(t-1) = X(t-1) + s \cdot n) = 1 - m, \quad s = \{-1, 1\} \quad (3.8)$$

Para calcular a probabilidade de transição de um estado (i) para um outro qualquer, de acordo com a figura 3.8, procede-se da seguinte maneira:

- $P_{d,i} \rightarrow$ é a probabilidade de, no instante t , está no estado (d), dado que no instante $t - 1$ estava no estado (i);

Usando essa notação, as equações (3.4), (3.5), (3.6), (3.7) e (3.8) foram reformuladas a seguir, nas equações (3.9), (3.10), (3.11), (3.12) e (3.13), respectivamente:

$$P_{i,i} = 1 - 2m \quad (3.9)$$

$$\sum_{v=0}^{\log_b n} P_{v,0} = m \quad (3.10)$$

$$\sum_{v=\frac{|k|}{k}(|k|+1)}^{\frac{|k|}{k} \log_b n} P_{v,k} = m \quad (3.11)$$

$$\sum_{v=0}^{\frac{|k|}{k}(|k|-1)} P_{v,k} = m, \quad 0 < |k| < \log_b n \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} P_{e,e} &= P_{-e,-e} \\ &= 1 - m \end{aligned} \quad (3.13)$$

Na equação abaixo, tem-se a fórmula geral da $P_{d,i}$ somente em função de $P_{i+1,i}$.

$$P_{d,i} = \frac{P_{i+1,i}}{b^{|d|-1}} \quad (3.14)$$

Assim sendo, $P_{i+1,i}$ pode ser aplicada na equação (3.10), por ser definida através da soma de todas as possibilidades de mudanças à direita ou à esquerda, pois, esta soma segue uma série geométrica de razão igual a $\frac{1}{b}$, além da probabilidade residual $\frac{P_{i+1,i}}{b^{(\log_b n)-1}}$ como descrita na equação (3.15).

$$\left(\sum_{v=0}^{(\log_b n)-1} \frac{P_{i+1,i}}{b^v} \right) + \frac{P_{i+1,i}}{b^{(\log_b n)-1}} = m, \quad v \geq 0 \quad (3.15)$$

Desenvolvendo o somatório da equação anterior, obtém-se a expressão descrita na equação (3.16):

$$P_{i+1,i} + \frac{1}{b}P_{i+1,i} + \frac{1}{b^2}P_{i+1,i} + \cdots + \frac{b}{n}P_{i+1,i} = m \quad (3.16)$$

Sendo essa equação a soma dos termos de uma progressão geométrica finita de razão $\frac{1}{b}$, termo inicial $P_{i+1,i}$ e último termo igual $\frac{b}{n}P_{i+1,i}$, a equação (3.17) é a continuação do desenvolvimento dessa equação, onde é obtida a probabilidade $P_{i+1,i}$ em função da equação (3.16) e da probabilidade residual descrita na equação (3.15). Na equação (3.17), a fórmula geral da $P_{i+1,i}$ é dada somente em função de b , em função de m definida na equação (3.10), e de n definida na equação (3.1) tornando a implementação do modelo muito mais simples.

$$P_{i+1,i} = \frac{mn(b-1)}{nb + b^2 - 2b}, \quad i = 0, \quad b > 1 \quad (3.17)$$

Para qualquer outra $P_{d,i}$, onde, $i = 0$, tem-se:

$$P(X'(t) = X(t) + \frac{|d| \cdot b^{|d-1|}}{d} | X'(t-1) = X(t-1)), \quad d > 0 \quad (3.18)$$

Na equação (3.19), é dada a soma de todas as $P_{d,i}$ em função de $P_{i+1,i}$ da figura 3.8 igual a um valor de probabilidade representado por m e definida na equação (3.10).

$$\sum_{v=0}^{(\log_b n)-i-1} \frac{P_{i+1,i}}{b^v} + \frac{P_{i+1,i}}{b^{(\log_b n)-i-1}} = m, \quad v \geq 0 \quad (3.19)$$

$$P_{i+1,i} + \frac{1}{b}P_{i+1,i} + \frac{1}{b^2}P_{i+1,i} + \dots + \frac{b^{i+1}}{n}P_{i+1,i} = m \quad (3.20)$$

Na equação (3.21), a fórmula geral da $P_{i+1,i}$ é dada somente em função de m , definida na equação (3.10), e n , definida na equação (3.1). Essa equação é a fórmula fechada para se calcular a probabilidade de transição de qualquer estado para qualquer outro estado do cadeia. Dessa forma, essa equação é a forma genérica da equação (3.17). Essa equação facilitou muito a tarefa de implementação do modelo MMIG.

$$P_{i+1,i} = \frac{mn(b-1)}{nb + b^{i+2} - 2b^{i+1}} \quad (3.21)$$

Na próxima fórmula tem-se o número de estados de cada cadeia. Esse número é importante para uma análise quantitativa da cadeia e para facilitar a implementação do modelo.

$$2(\log_b n + 1) + 1 \quad (3.22)$$

Como mostrado analiticamente ao longo dessa seção, o modelo MMIG possui as seguintes características:

- A distribuição das probabilidades de um estado (i) segue uma série geométrica de razão $\frac{1}{2}$, ou seja, o valor de $P_{\frac{|i|}{2}(|i|+2),i}$ é a metade do valor de $P_{\frac{|i|}{2}(|i|+1),i}$, $|i| \neq 0$;

- A velocidade aumenta exponencialmente até o valor máximo n ;
- Estando num estado ($i \rightarrow \text{positivo}$), não é possível passar para um estado ($i \rightarrow \text{negativo}$) sem passar pelo estado (0) e vice-versa. Através dessa característica, o modelo MMIG evita mudanças bruscas de direção.

3.3.2 Perfis de Mobilidade

Como foi definido na seção 3.2.2, o perfil de mobilidade é caracterizado por um subconjunto de valores atribuídos aos parâmetros do modelo. Dessa maneira, cada perfil de mobilidade do modelo MMIG representa um comportamento específico de movimentação. Para gerar diferentes perfis de mobilidade basta atribuir diferentes valores para os parâmetros b , m e n , como mostrado a seguir.

Perfil de Mobilidade MMIGa

O perfil de mobilidade MMIGa é semelhante ao modelo B proposto em [25], porém com o parâmetro n igual a 16. Esse perfil é definido pelo ajuste dos parâmetros m , n e b da seguinte forma: 0,4; 16 e 2, respectivamente, como pode ser observado na figura 3.9.

Como foi apresentado, o modelo MMIG tem a capacidade de representar tanto padrões de movimentação de apenas um incremento nas coordenadas x e y (como por exemplo o modelo MMIS), como diferentes valores de incrementos nessas coordenadas. Sendo assim, o modelo MMIG é genérico, possibilitando representar vários padrões de movimentação.

3.4 Avaliação dos Modelos Propostos

Nas seções 3.2.1 e 3.3.1, foram apresentadas as modelagens analíticas dos modelos MMIS e MMIG propostos nesse trabalho. Para avaliação das modelagens apresenta-

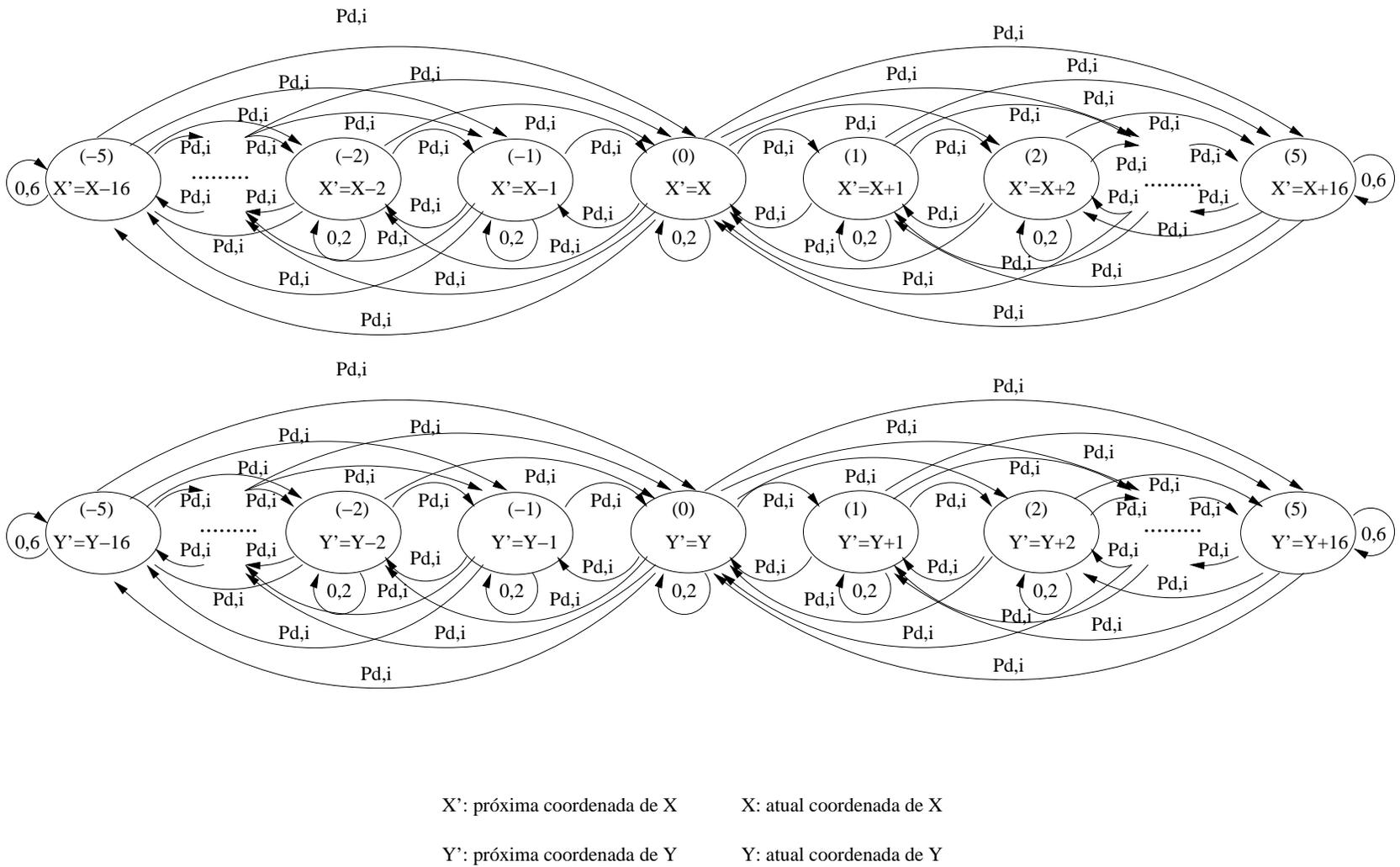


Figura 3.9: Diagrama de transição de estado do perfil MMiGa

das, os modelos propostos foram analisados através de simulações. Nas seções abaixo serão descritas as métricas de desempenho usadas na avaliação, as características e parâmetros dos cenários das simulações realizadas, além dos resultados obtidos.

3.4.1 Métricas de Desempenho

Foram identificadas e propostas algumas métricas de desempenho que se mostraram apropriadas para avaliação comparativa entre esse trabalho e outros modelos propostos na literatura, a saber: mudanças bruscas de direção, paradas abruptas e acelerações bruscas, variações bruscas de velocidade. Essas métricas foram adequadas para avaliarem o nível de proximidade dos modelos de mobilidade com o comportamento real de movimentação de NMS em ambientes urbanos e em rodovias. Cada métrica será definida a seguir.

Nesse trabalho foi definido que uma mudança de direção é brusca quando o ângulo de mudança de direção do movimento estiver no intervalo $[90^\circ, 180^\circ]$ ou $[135^\circ, 180^\circ]$. Essa métrica indica se as mudanças de direção são suaves ou não, pois, um usuário normalmente muda de direção com um ângulo de 90° no máximo. Dessa forma, um mudança com o ângulo maior que 90° é considerada brusca.

Paradas abruptas no movimento são caracterizadas por uma desaceleração muito rápida do NM fazendo com que a sua velocidade chegue a zero muito rapidamente. Para que uma parada seja considerada abrupta, duas condições devem ser satisfeitas. Primeira, um NM que no instante de tempo (t) possuía uma velocidade v , ao passar para o instante de tempo ($t + 1$) sua velocidade deve se igualar a zero. Segunda, sua variação de velocidade (ΔV) deve ser maior ou igual a 50% da velocidade máxima simulada (v_{max}).

Acelerações bruscas possuem uma definição semelhante a de paradas abruptas, porém com uma aceleração positiva. Novamente devem ser consideradas duas condições para que uma aceleração no movimento seja considerada brusca. Primeira, no instante de tempo (t), o NM possuía uma velocidade igual a zero e ao passar para o instante de tempo ($t + 1$) a sua velocidade alcança o valor v . Segunda, sua

ΔV deve ser maior ou igual a 50% da velocidade máxima simulada.

Variações bruscas de velocidade é a métrica definida pela ΔV de um NM. A ΔV é calculada a partir da diferença entre a velocidade v_{t+1} e v_t , as quais ocorrem nos instantes de tempo $(t + 1)$ e (t) , respectivamente. Essa variação é considerada brusca se seu valor for maior ou igual a 50% de v_{max} , onde v_t e v_{t+1} são definidas no intervalo $[0, v_{max}]$.

3.4.2 Cenários das Simulações

Na literatura existem vários geradores de cenários de mobilidade, como apresentado em [38], mas, o gerador *Scenario Generator* (ScenGen) [39] se mostrou mais adequado pela facilidade de se inserir novos modelos de mobilidade e por gerar uma saída configurada para o uso no simulador de redes NS [10].

O desenvolvimento de novos modelos no ScenGen é feita através da linguagem de programação C++. Dessa forma, os modelos propostos foram adicionados ao conjunto de modelos disponíveis dessa ferramenta e, para esses modelos, as regras de borda, descritas na seção 2.3, foram implementadas como pode ser visto no apêndice A deste trabalho. Já nos apêndices B e C, os simuladores ScenGen e NS são, respectivamente, descritos em detalhes.

Foram avaliados os modelos: *waypoint*, MPA e os modelos propostos, MMIS e MMIG. O modelo *waypoint* foi configurado com uma velocidade distribuída uniformemente entre 0 e 12 m/s e tempo de pausa igual a zero (ajuste necessário para ser feita a comparação entre os modelos). O modelo MPA foi ajustado para permitir uma velocidade de 5m/s e 7,07m/s. O modelo proposto MMIS, também foi ajustado com a mesma velocidade do MPA e a matriz de probabilidade do perfil de mobilidade MMISa. Já o modelo MMIG foi configurado com o perfil de mobilidade MMIGa, cuja velocidade varia entre 0 e 11,31m/s.

O cenário de simulação foi composto por uma área de 700m x 500m, com 50 NM inicialmente posicionados aleatoriamente. Foram realizadas 100 simulações para

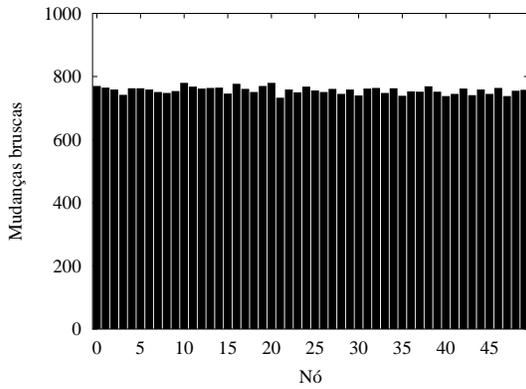
cada modelo com o nível de confiança igual a 0,95.

3.4.3 Resultados Obtidos

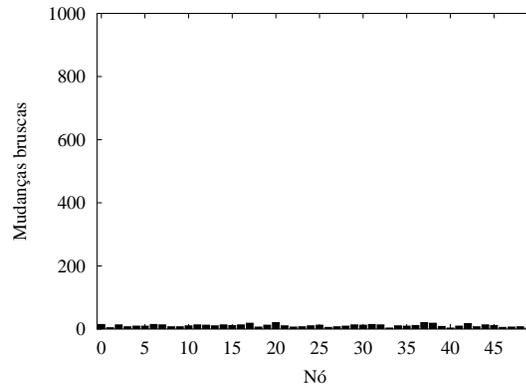
Conforme descrito na seção 2.2.1, o tempo de movimentação de um NM no modelo *waypoint* é variável e está diretamente relacionado ao valor de sua velocidade e tamanho da área de simulação, como mostrado em [27]. Assim sendo, a quantidade de mudanças de direção do movimento e a variação da velocidade de um determinado NM durante um período de tempo, não é um valor constante. Além disso, o tempo de movimentação de um NM no modelo MPA e nos modelos propostos é constante. Dessa forma, quando observa-se o número de mudanças de direção e de velocidade nos três modelos com o intuito de compará-los, o tempo de simulação para cada modelo será o suficiente para que ocorram exatamente 1000 mudanças de direção no movimento do NM. Esse valor foi escolhido por ser representativo e para facilitar a apresentação e comparação dos resultados.

Na figura 3.10 são apresentados os gráficos que mostram o número de mudanças bruscas, quando o ângulo de mudança de direção for igual ou maior que 90° . No modelo *waypoint*, figura 3.10(a), as mudanças de direção são uniformemente distribuídas no intervalo $[0^\circ, 180^\circ]$, onde o valor de mudanças bruscas seria de aproximadamente 50% do total das mudanças, sob condições ideais (área de movimentação ilimitada). Entretanto, os resultados obtidos nas simulações foram de aproximadamente 75%. Isso ocorre por dois fatores: a área é limitada e, portanto, há situações em que o NM alcança a borda da área de simulação. Logo, seu movimento é finalizado e é escolhido aleatoriamente uma nova velocidade e posição seguindo uma distribuição uniforme, dentro da área de simulação, comportamento parecido com a regra de borda *bounce*. Esse comportamento aumenta a probabilidade de mudanças bruscas. O outro fator é a razão entre a velocidade e a área de movimentação. Quanto maior for esse valor, maior será a probabilidade de mudanças de direção e, conseqüentemente, maior a de mudanças bruscas.

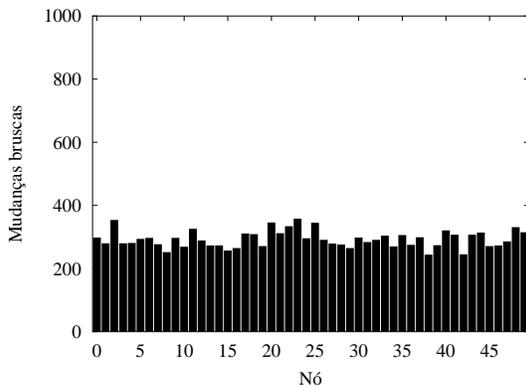
No modelo MPA, figura 3.10(b), as mudanças bruscas foram de aproxima-



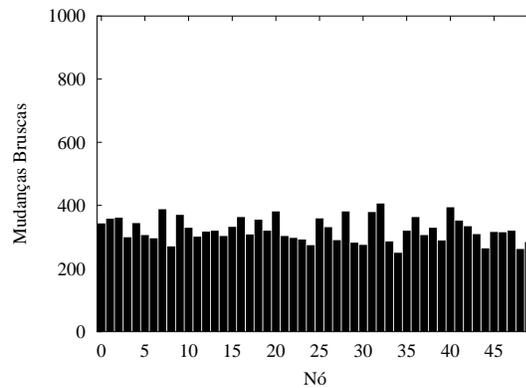
(a) Modelo Waypoint



(b) Modelo MPA



(c) Modelo MMIS



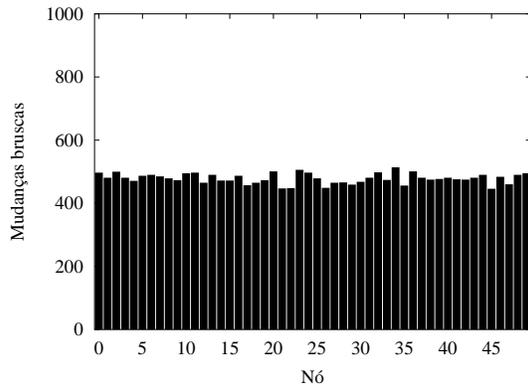
(d) Modelo MMIG

Figura 3.10: Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 90^\circ$

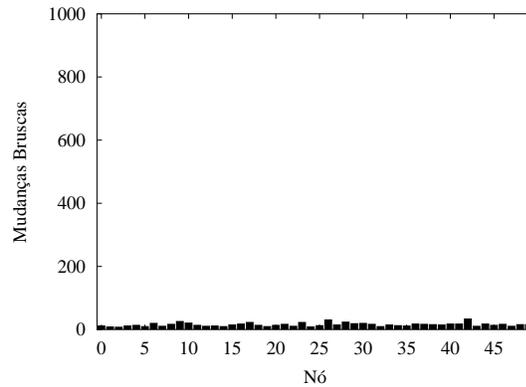
mente 3%, valor que já era esperado devido as características do modelo de ser com memória, possibilitar raríssimas paradas e poucos movimentos na vertical e horizontal, fazendo com que o movimento seja suave e basicamente nas diagonais. Para o modelo MMIS também obteve-se o resultado desejado. Como é ilustrado na figura 3.10(c), cerca de 30% das mudanças foram bruscas. De forma semelhante ao modelo MPA, o modelo MMIS também é com memória. Além disso, o modelo MMIS adiciona a capacidade de movimentação na vertical e horizontal.

Por fim, o modelo MMIG, figura 3.10(d), possui um comportamento semelhante ao modelo MMIS, porém, devido à uma quantidade maior de variações de direção,

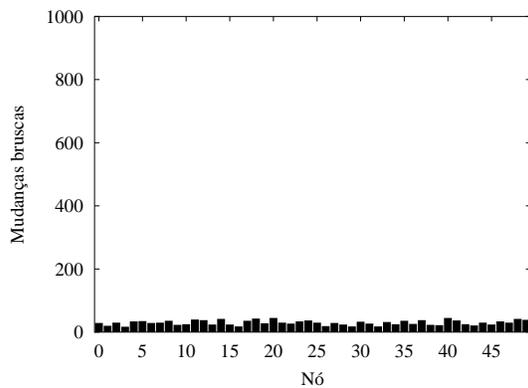
esse modelo possui um número maior de mudanças bruscas ficando em torno de 37%. Essas características fazem com que a probabilidade de mudanças bruscas dos modelos MMIS e MMIG, possuam um valor intermediário entre os modelos MPA e *waypoint*. Portanto, os valores de probabilidade obtidos confirmam a modelagem analítica.



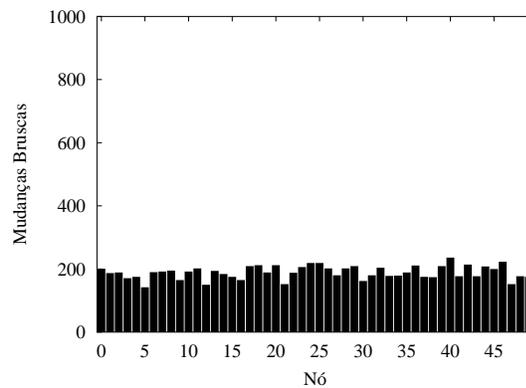
(a) Modelo Waypoint



(b) Modelo MPA



(c) Modelo MMIS



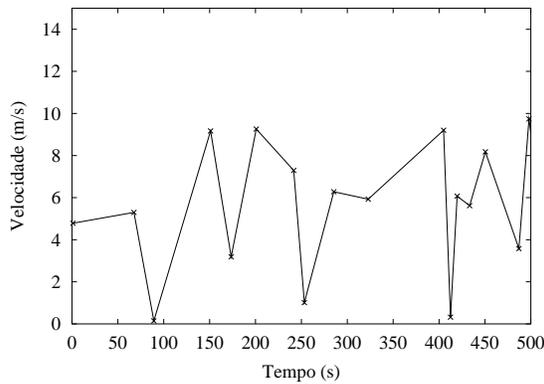
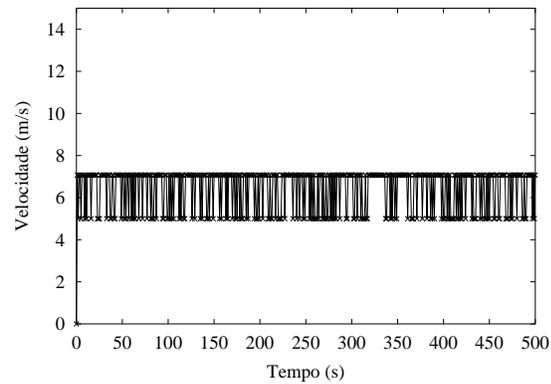
(d) Modelo MMIG

Figura 3.11: Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 135^\circ$.

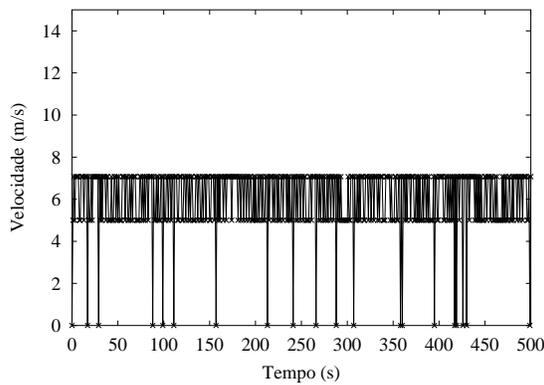
Na figura 3.11, o ângulo de mudança de direção é igual ou maior que 135° , ou seja, a mudança de direção é ainda mais brusca. Novamente, os resultados obtidos por simulação para o modelo *waypoint*, apresentaram um valor de probabilidade superior ao inferido analiticamente. A justificativa para tanto é a mesma descrita

anteriormente. O valor probabilístico obtido foi de aproximadamente 47% (usando área limitada), enquanto que o esperado seria inferior a 30% (área ilimitada).

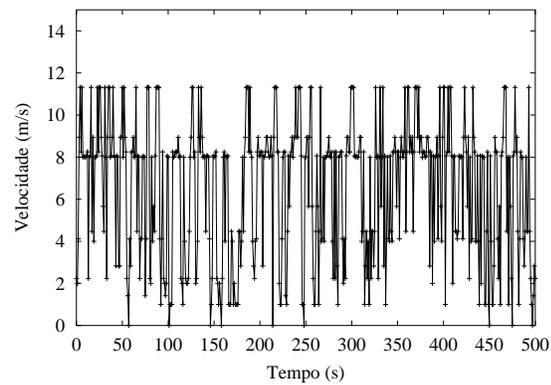
Para os modelos MMIS e MPA foram obtidos valores que se mantiveram abaixo de 5%, confirmando a abordagem analítica. Esse resultado era esperado, uma vez que um baixo valor probabilístico está associado ao ângulo de mudança de direção igual a 180° no modelo MPA e aos ângulos 135° e 180° para o modelo MMIS.

(a) Modelo *Waypoint*

(b) Modelo MPA



(c) Modelo MMIS



(d) Modelo MMIG

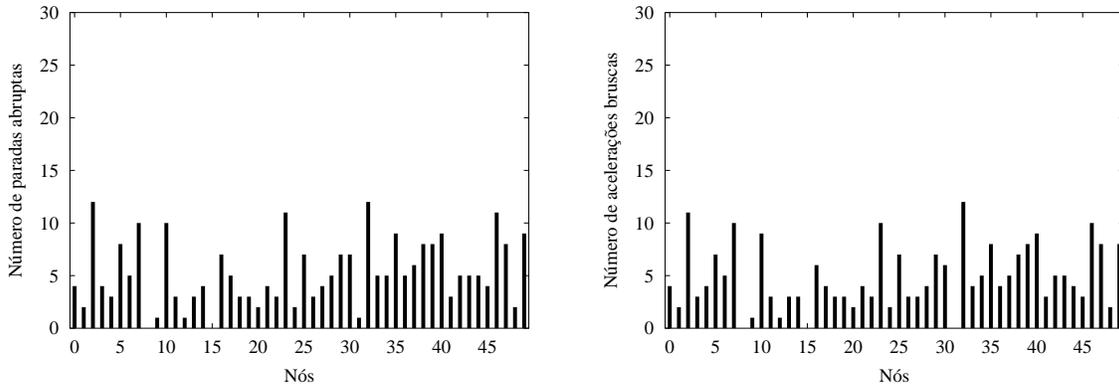
Figura 3.12: Variação da velocidade média.

A métrica variação de velocidade é importante tanto nos padrões de mobilidade que não suportam grandes mudanças de velocidade, como a movimentação de pessoas no centro de uma cidade, como nos padrões que possuem mudanças de velocidade, como um automóvel movendo-se por uma rodovia. Entretanto, essas

mudanças devem ser suaves na maioria das vezes. Assim sendo, essa métrica é observada nos gráficos da figura 3.12, onde o modelo *waypoint* possui uma variação considerável na velocidade, ou seja, em curtos períodos de tempo a velocidade sofre picos e quedas freqüentes, o que causa um comportamento não realístico no movimento. No modelo MPA, a ΔV ocorre apenas entre os valores 5 m/s e 7,07 m/s, o que faz com que não ocorram picos e quedas. Já no modelo MMIS, como era esperado, a variação da velocidade é suave, até mesmo porque, o modelo suporta os mesmos valores de velocidade do MPA e o valor zero, que representa as paradas no movimento do NM. No modelo MMIG, a velocidade fica entre 11,31 m/s e 0 m/s, permitindo uma maior ΔV , ou seja, acelerações e desacelerações na velocidade, que na maioria das vezes são suaves. Nesse modelo, quanto mais próximo de um for ajustado o valor da base b do incremento do deslocamento, maior será a suavização na variação da velocidade.

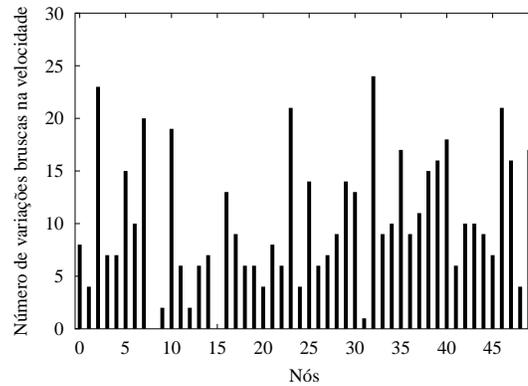
Na figura 3.13, é descrito o comportamento da ΔV dos NMs no modelo *waypoint* durante o tempo total de simulação que foi de 1.000 segundos. No gráfico (a) dessa figura, é mostrado o número de ocorrências de paradas abruptas, que são altas desacelerações no movimento do NM. No gráfico (b) as acelerações bruscas mostram-se semelhantes as paradas abruptas e no gráfico (c) o número total de variações na velocidade, maiores que 50% da velocidade máxima. Verifica-se que quase todas as variações na velocidade, cerca de 97%, foram as próprias acelerações e desacelerações bruscas, mostrando assim o comportamento não realístico desse modelo.

Usando essas mesmas métricas, na figura 3.14, é apresentada uma avaliação da ΔV no modelo MMIG. No gráfico (a), observa-se que houve uma quantidade muito menor de paradas abruptas, aproximadamente 25% do número total de mudanças bruscas na velocidade do movimento, geradas através desse modelo, se comparado com o modelo *waypoint*, que foi da ordem de 48% do total de mudanças bruscas. Em relação às acelerações bruscas, ilustradas no gráfico (b), elas representam 40% do total das mudanças bruscas e novamente apresenta uma quantidade de acelerações bruscas menor que no modelo *waypoint*. Por fim, no gráfico (c) têm-se o número total de variações bruscas na velocidade gerada pelo modelo MMIG, onde pode-se observar que cerca de 35% da variação brusca não são, nem acelerações, nem desacelerações



(a) Paradas abruptas

(b) Acelerações bruscas

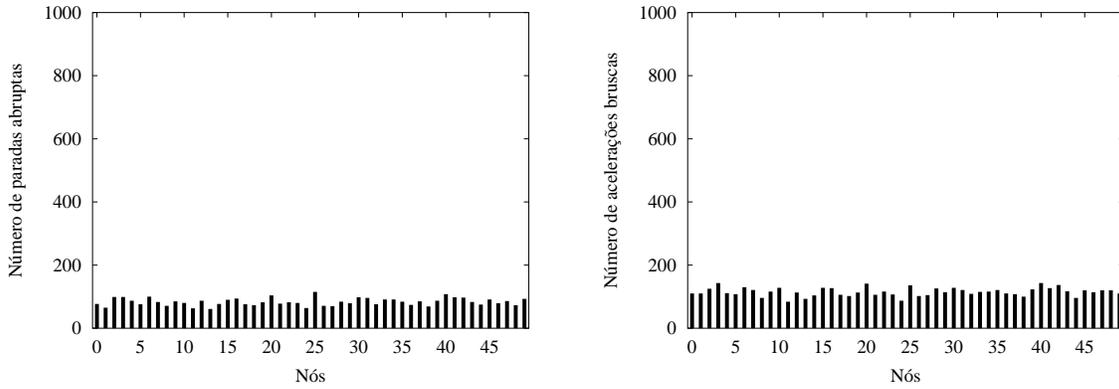


(c) Mudanças bruscas de velocidade

Figura 3.13: Variação brusca da velocidade $\geq 50\%$ no modelo *waypoint*.

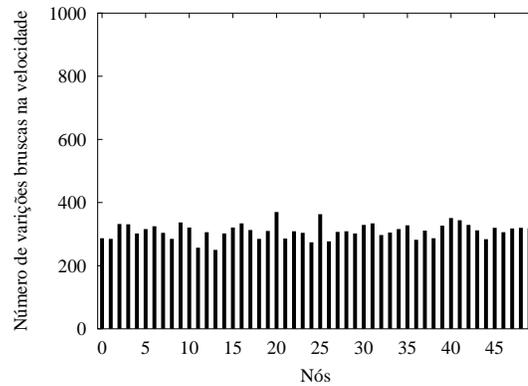
bruscas mostrando assim, um comportamento mais próximo da realidade que o modelo *waypoint*. Entretanto, este tipo de comportamento também não é aceitável em algumas situações. Nesses casos, é necessário ajustar o parâmetro b do modelo MMIG, de maneira a permitir uma variação mais suavizada da velocidade.

Com o objetivo de avaliar o impacto das regras de borda no modelo MMIG, é mostrado na figura 3.15, o número de mudanças bruscas de cada nó, com o ângulo de mudança de direção $\geq 90^\circ$. A figura 3.15(a) ilustra esse número quando utiliza-se a regra de borda *bounce* e na figura 3.15(b) é mostrado o impacto da regra *bounce* modificado, cujo ângulo de mudança de direção β , está distribuído uniformemente entre $[0^\circ, 180^\circ]$ para as bordas: superior, inferior e laterais, e entre $[0, 90^\circ]$ nos



(a) Paradas abruptas

(b) Acelerações bruscas



(c) Mudanças bruscas de velocidade

Figura 3.14: Variação brusca da velocidade $\geq 50\%$ no modelo MMIG.

cantos da área de simulação. Como a segunda regra é uma variação da primeira, elas possuem um comportamento semelhante, o que explica o impacto parecido na métrica de mudança brusca de direção.

Já nas figuras 3.15(c) e (d), o modelo MMIG utilizou as regras *wrap around* e *delete and replace*, respectivamente, onde observa-se uma ligeira queda no número de mudanças bruscas, quando comparado com as regras *bounce* e *bounce* modificado. Através dos gráficos dessa figura, concluí-se que há uma pequena variação no comportamento de mudanças de direção, quando utiliza-se um regra de borda diferente. Dessa forma, devem existir critérios para a utilização de uma regra de borda mais adequada como mencionado na seção 2.3.

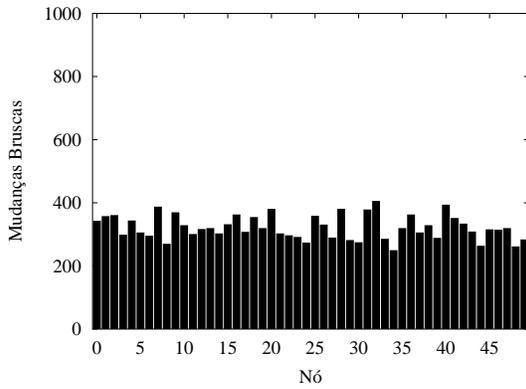
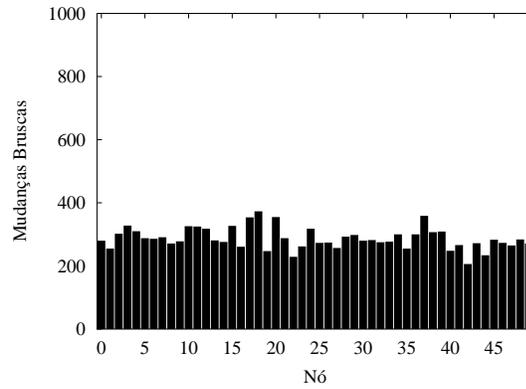
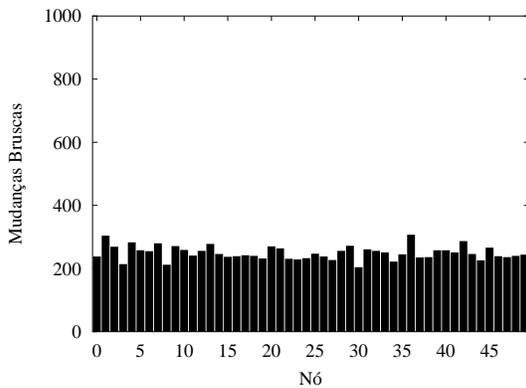
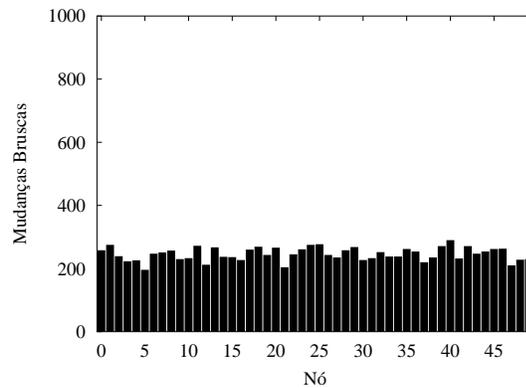
(a) Regra de borda *bounce*(b) Regra de borda *bounce modificado*(c) Regra de borda *wrap around*(d) Regra de borda *delete and replace*

Figura 3.15: Número de mudanças bruscas com o ângulo de mudança de direção $\geq 90^\circ$ no modelo MMIG com diferentes regras de borda

A partir dos resultados apresentados nesta seção, fica evidenciado a eficácia dos modelos propostos e o comportamento não realístico do modelo *waypoint*, que é atualmente o modelo mais utilizado na literatura. Além disso, como os modelos propostos são parametrizáveis, esses possuem um potencial de aplicabilidade muito grande, bastando apenas fazer um ajuste fino dos seus parâmetros de acordo com as características de cada perfil de movimentação.

Neste capítulo os modelos foram avaliados em relação aos seus próprios comportamentos de movimentação. No próximo capítulo, será apresentada uma avaliação de desempenho de alguns protocolos de roteamento levando em consideração o mo-

delo de mobilidade e a regra de borda escolhida.

Capítulo 4

Aplicações dos Modelos Propostos em Cenários de Redes Móveis *Ad hoc*

PARA motivar o uso dos modelos de mobilidade propostos MMIS e MMIG, apresentados no capítulo 3, é descrito nesse capítulo um estudo e avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento AODV, DSDV e DSR sob a influência do modelo de mobilidade utilizado. Através da avaliação realizada foram obtidos, por simulação, novos resultados sobre o impacto da mobilidade no roteamento dos dados. Além disso, são sugeridos alguns estudos de caso de utilização dos modelos propostos em aplicações e sub-sistemas de comunicação das redes móveis *ad hoc*.

4.1 Protocolos de Roteamento para Redes Móveis *Ad-hoc*

Como foi descrito no capítulo 1, as redes móveis *ad hoc* não possuem uma infraestrutura de comunicação e distribuição de dados. Sendo assim, encaminham os dados diretamente ou através dos seus nós intermediários quando o nó destino não está dentro do alcance do nó origem. Dentro desse contexto, todos os nós têm, potencialmente, a capacidade de rotear os dados, ou seja, podem atuar como roteadores.

Para realizar o roteamento é necessário a utilização do mecanismo denominado de protocolo de roteamento ¹. Esses protocolos são definidos como sendo um conjunto de regras pré-estabelecidas cujo objetivo é construir e gerenciar rotas para a realização do encaminhamento de dados entre os componentes da rede.

Existem características desejáveis a todos os protocolos de roteamento [9, 40, 41]. As principais são: escolha da melhor rota, simplicidade, robustez, imparcialidade, estabilidade, rapidez na convergência para o caminho ótimo, flexibilidade, aceitar parâmetros de qualidade de serviço (QoS), ser independente da tecnologia da rede. A principal de todas estas características é sem dúvida a robustez, ou seja, a rede deve ficar funcionando sem interrupções ou falhas durante anos. Dentro desse contexto, o grupo MANET [6] do IETF [42], através da RFC 2501 [3], definiu que características um protocolo de roteamento deve apresentar, listadas a seguir: funcionamento de forma distribuída, evitar *loops* no roteamento, operar de acordo com a demanda, suportar funcionamento pró-ativo e prover mecanismos de segurança.

Os protocolos de roteamento para redes móveis *ad hoc* são classificados em *unicast* e *multicast* [4, 17, 21, 40, 41]. No grupo de protocolos *unicast* têm-se: os pró-ativos (DSDV [43], WRP [4]), os reativos (AODV [44], DSR [24], TORA [45]), os híbridos, que são pró-ativos dentro de uma zona de roteamento e reativo entre essas zonas (ZRP [36]) e também os com informações de localização (DREAM [22], LAR [23]). Já o grupo de protocolos *multicast* são divididos em dois sub-grupos [5, 41, 46]: baseado em árvores e baseado em uma malha (*mesh*). Os protocolos baseados em árvores, que são: MAODV, AMRoute, AMRIS, usam uma árvore compartilhada para entregar os pacotes à um grupo de NMs. Já os protocolos baseados em malhas, que são: ODMRP e CAMP, usam um conjunto de NMs ou uma malha para encaminhar os pacotes. Existem vários protocolos de roteamento para redes móveis *ad hoc*, além desses aqui citados, tanto para comunicação *unicast*, quanto para *multicast*. Nas seções abaixo, são descritas classes: pró-ativos e reativos, e seus principais protocolos de roteamento.

¹Roteamento é a principal função da camada de rede e envolve duas operações básicas: a determinação das rotas e o transporte dos pacotes [40, 41]. Pacote é a unidade básica de todas as informações que trafegam pela rede.

4.1.1 Protocolos de Roteamento Pró-ativos

Os protocolos pró-ativos mantêm informações sobre rotas para todos os nós da rede, mesmo que o nó nunca tenha utilizado muitas dessas rotas, tanto para enviar seus próprios pacotes, como para enviar pacotes de outros nós. São usadas mensagens periódicas, trocadas entre todos os nós da rede, para manter a tabela de rotas de cada um constantemente atualizada. O exemplo mais citado desse tipo de protocolo é o *Destination-Sequenced Distance Vector* - DSDV [43].

Destination-Sequenced Distance-Vector - DSDV

O protocolo DSDV é baseado no algoritmo vetor de distâncias (distance vector). A melhoria desse protocolo, é que ele evita *loops* de roteamento. Cada NM mantém uma tabela de roteamento que possui uma entrada para cada destino na rede não particionada e o número de saltos de roteamento para cada destino é armazenado. São realizadas atualizações periódicas para o DSDV manter as tabelas de roteamento consistentes. As atualizações são também utilizadas para propagar rapidamente as mudanças na topologia, além disso, os pacotes de atualização acrescentam os destinos acessíveis de cada nó e o número de saltos requeridos.

Com o recebimento do pacote de atualização de rotas, cada nó verifica as informações em sua tabela. Com isso, as rotas com seqüências antigas são descartadas. Já as rotas com seqüências iguais, a rota de menor métrica é escolhida, sendo assim incrementada de um salto. As novas rotas são propagadas aos vizinhos.

Quando uma enlace é rompido, as rotas que passam por ele são marcadas e anunciadas com o valor da métrica tendendo a infinito. Assim sendo, essas rotas serão trocadas por outras rotas de seqüências menores.

Uma das principais vantagens do DSDV é evitar *loops*. Entretanto, o DSDV gera uma sobrecarga excessiva na comunicação devido as atualizações das rotas e conseqüentemente, uma latência maior. Além disso, o DSDV não suporta roteamento com múltiplos caminhos.

4.1.2 Protocolos de Roteamento Reativos

Os protocolos reativos realizam o estabelecimento de uma rota apenas quando ela é solicitada pelo nó origem. Um processo de descoberta de rota é iniciado quando um determinado destino deve ser alcançado e não existe rota estabelecida para o mesmo. As rotas são mantidas na tabela de roteamento até que deixem de existir, ou após um determinado tempo sem que tenham sido utilizadas. Como o processo de descoberta de rota é realizado apenas quando uma origem qualquer faz uma requisição, esse tipo de protocolo normalmente gera menos sobrecarga do que os pró-ativos, em detrimento do tempo de espera para ter a rota solicitada estabelecida. Os protocolos *Ad hoc On Demand Distance Vector*- AODV [44] e o *Dynamic Source Routing* - DSR [24] são os principais exemplos de protocolos reativos.

Ad Hoc On-Demand Distance Vector Routing - **AODV**

O protocolo AODV é baseado em vetor de distâncias (distance vector). O AODV busca eliminar a necessidade de difundir globalmente as informações de roteamento. Outra ponto importante do AODV é tentar minimizar o atraso quando novas rotas são requisitadas. Esse protocolo força todos os nós a estabelecerem dinamicamente entradas em tabelas de roteamento locais para cada destino. Cada nó sabe qual é o próximo a chegar ao destino e a distância em número de saltos.

Quando um nó precisa entrar em contato com um outro o qual ele não possui uma rota em sua tabela, é iniciado o processo de descoberta de rota. Esse processo consiste na difusão de um RREQ, (*route request*), para todos os nós vizinhos desse que deseja descobrir a nova rota. Seus vizinhos por sua vez propagam essa requisição. O processo é repetido até que o nó destino seja alcançado ou que um nó intermediário conhecendo a rota até o destino seja encontrado. Durante o processo de descoberta da rota, os nós que recebem a RREQ incluem entradas temporárias em suas tabelas, registrando a origem da mensagem RREQ.

Quando o destino ou um nó intermediário que possua uma rota para o mesmo são encontrados, um *route reply*, RREP, é enviado de volta para a origem da requisição. Essa mensagem RREP, viaja de volta para a origem através do caminho

que foi montado através dos nós intermediários enquanto a mensagem RREQ era encaminhada a diante. Sendo assim a RREP não precisa ser transmitida através de broadcast, basta um *unicast* através do caminho reverso montado. Enquanto a mensagem RREP é propagada cada nó que a recebe incrementa o campo correspondente a quantidade de saltos necessários para se alcançar o destino.

Uma vez estabelecida, a rota é mantida através de mensagens HELLO. Essas são mensagens periódicas enviadas por um nó para aqueles vizinhos os quais possuam rotas que passam através dele. Assim, seus vizinhos são capazes de saber se a rota ainda existe ou não. Caso a mensagem HELLO não seja recebida durante um determinado período de tempo, assume-se que ocorreu uma quebra em algum enlace pertencente a rota, tornando-a inválida. Se a rota ainda estava sendo usada o nó pode realizar uma nova requisição, RREQ, em busca de uma nova rota.

Dynamic Source Routing - DSR

O DSR é do tipo roteamento na origem, ou seja, determina todo o caminho a ser percorrido. Dessa maneira, não é necessário manter atualizações das rotas. Além disso, ele usa um *cache* de rotas que armazena rotas aprendidas anteriormente pelo processo de descoberta de rotas ou por operar em modo promíscuo². Essa *cache* é continuamente atualizada e caso uma entrada não seja utilizada durante um certo período de tempo, esta é apagada.

Quando um nó fonte não possui a rota para enviar pacotes para um destino, é necessário o uso do mecanismo de descoberta de rotas, que inunda a rede com RREQs (*Route Requests*). Caso um nó receba um requisição de uma nova rota e saiba uma resposta, esta deve responde com um RREP (*Route Replay*). Por outro lado, quando um nó percebe a quebra de um enlace, um RERR (*Route Error*) é enviado para a fonte pelo caminha reverso, como funciona o procedimento de manutenção rotas.

No DSR, é permitido que um nó armazene para um mesmo destino várias possíveis rotas aprendidas por qualquer método de apresentado.

²Modo promíscuo representa o estado em que o dispositivo coleta informações da rede sem eventualmente transmitir informações. Desta forma, este dispositivo pode aprender rotas sem gerar sobrecarga de roteamento.

Para avaliar o desempenho de um protocolo de roteamento [5, 11, 2] são necessárias várias análises em relação ao alcance de transmissão dos NMs, às características do tráfego, ao tamanho dos *buffers* para o armazenamento das mensagens e os padrões de movimentação dos usuários da rede. Na próxima seção desse trabalho, será abordado com um nível maior de detalhamento o último tópico de avaliação que são os padrões de movimentação dos usuários.

4.2 Avaliação do Impacto dos Modelos de Mobilidade no Desempenho dos Protocolos AODV, DSDV e DSR

Nesta seção será avaliado o impacto que os modelos de mobilidade causam nos protocolos AODV, DSDV e DSR. Essa avaliação tem como objetivo mostrar a importância da escolha criteriosa de modelos de mobilidade e das regras de borda que representem um determinado ambiente ou comportamento de movimentação de maneira mais realística, como discutido em [5, 11, 25, 47]. Pois, até então, a grande maioria das avaliações realizadas nos subsistemas e aplicações para redes *ad hoc* utilizam o modelo de mobilidade *waypoint*. A seguir serão apresentadas as métricas de desempenho, o ambiente de simulação e os resultados obtidos.

4.2.1 Métricas

Para avaliação dos protocolos foram utilizadas as seguintes métricas de desempenho: taxa de entrega de pacotes, sobrecarga de roteamento, número de pacotes recebidos, número de pacotes enviados e número de pacotes de roteamento. Essas métricas serão definidas a seguir.

Taxa de entrega de pacotes: é definida como sendo a razão entre o número de pacotes recebidos pela aplicação no destino e o número de pacotes enviados pela

aplicação na origem. Essa métrica é utilizada para avaliar-se a eficiência do protocolo, ou seja, eficiência é diretamente proporcional a vazão máxima e inversamente proporcional a taxa de perda. Além disso, quanto maior a taxa de entrega de pacotes, maior será a vazão (*throughput*) da rede e conseqüentemente a vazão efetiva (*goodput*).

Número de pacotes recebidos: é a quantidade de pacotes da aplicação que chegaram no seu destino corretamente. Essa medida é utilizada na métrica taxa de entrega.

Número de pacotes enviados: é a quantidade de pacotes da aplicação que são enviados pela origem. Essa medida é utilizada na métrica taxa de entrega.

Sobrecarga de roteamento na rede: é calculada através da razão entre a quantidade de pacotes de roteamento transmitidos na rede e o número de pacotes de dados enviados pela aplicação. Essa métrica é importante, pois determina a capacidade de escalabilidade do protocolo, ou seja, quanto menor for a banda passante da rede, menor deve ser o tráfego de roteamento quando comparado com o tráfego de dados da aplicação. Em uma rede congestionada, a sobrecarga de roteamento ocasiona descarte de pacotes em geral, prejudicando a vazão da rede e a descoberta e atualização de rotas. Além disso, a sobrecarga afeta o consumo de energia das baterias e com um maior número de pacotes de roteamento trafegando pela rede, maior será a probabilidade de colisão, fato este que influencia tanto, a taxa de entrega de pacotes, quanto o atraso fim-a-fim.

Número de pacotes de roteamento: é a quantidade de pacotes de descoberta e manutenção das rotas enviados pela origem ou encaminhados pelos nós intermediários. Esse valor é necessário para o cálculo da sobrecarga de roteamento na rede.

4.2.2 Ambiente da Simulação

Como ambiente de simulação foi escolhido o simulador de redes NS (*Network Simulator*) [10] através da versão 2.1b9, para simular a rede *ad hoc* e o gerador de

cenários ScenGen [39] para simular os modelos de mobilidades escolhidos. Para o cenário de simulação usou-se uma área retangular de 700m x 500m, contendo 50 NMs inicialmente posicionados de forma aleatória. O raio de alcance da antena de cada NM foi configurado em 250m e utilizou-se o protocolo de acesso da camada MAC do padrão IEEE 802.11 no modo DCF (*Distributed Coordination Function*). Os protocolos de roteamento avaliados foram: AODV, DSDV e DSR, e os modelos de mobilidade utilizados foram: *waypoint*, MMIS e o MMIG. Para o modelo MMIG foram utilizadas as regras de borda: *bounce*, *bounce* modificado e a *delete and replace*.

Como especificação de tráfego na rede, optou-se por um tráfego de taxa constante (CBR), em vez de utilizar o TCP (*Transmission Control Protocol*), pois, seu mecanismo de controle de congestionamento afetaria a avaliação dos protocolos. Com o objetivo de avaliar diferentes cargas na rede, utilizou-se 5, 10 e 20 pares de fontes de tráfego CBR numa taxa de 4 pacotes de 512 bytes por segundo. Essas fontes foram inicializadas aleatoriamente e mantidas até o final da simulação. Cada cenário avaliado foi simulado 10 vezes e retirado o valor médio com um nível de confiança igual a 0,90.

4.2.3 Resultados Obtidos

Tabela 4.1: A influência dos modelos de mobilidade no desempenho do protocolo AODV.

Métrica de Desempenho	Modelo <i>Waypoint</i>	Modelo MMIS	Modelo MMIG
No. de pacotes recebidos	2.334	1.799	1.753
No. de pacotes Enviados	2.471	2.485	2.226
Taxa de entrega	94,46%	72,39%	78,75%
No. de pacotes de roteam.	8.139	34.464	25.337
Sobrecarga de roteamento	3,29	13,87	11,38

Na tabela 4.1, é apresentado o desempenho do protocolo AODV para as métricas definidas na seção 4.2.1 sob a influência dos modelos *waypoint*, MMIS e MMIG.

Neste cenário, a velocidade média dos modelos ficou em torno de 11m/s, onde foi gerado um tráfego de 10 fontes CBR inicializadas aleatoriamente e mantidas até o final da simulação que foi de 1000 segundos . Observa-se uma enorme variação na taxa de entrega de pacotes com o AODV quando troca-se o modelo de mobilidade. Utilizando o *waypoint* tem-se uma taxa de entrega de aproximadamente 94,5%, entretanto, quando se usa os modelos MMIS e MMIG, as quais foram comprovados mais realistas que o *waypoint*, a taxa de entrega diminui para 72,4% e 78,75%, respectivamente. Com isso, a métrica taxa de entrega teve uma queda de aproximadamente 22% entre o *waypoint* e o MMIS, e de 16% entre os modelos *waypoint* e o MMIG.

Essa queda na taxa de entrega demonstra que as avaliações de desempenho realizadas no protocolo AODV com o modelo *waypoint*, podem apresentar um valor super estimado, fato que pode afetar a validação de avaliações de aplicações e subsistemas que utilizam o AODV. A alta taxa de entrega é explicada pelo fato do *waypoint* gerar cerca de 75% de mudanças bruscas na direção. Isso faz com que os NMS fiquem, em média, melhor distribuídos dentro da área de simulação, o que não acontece nos modelos MMIS e MMIG.

Na métrica sobrecarga de roteamento é observado esse mesmo comportamento, sendo até mais acentuado, visto que o valor para essa métrica utilizando o modelo *waypoint* é de aproximadamente 3,3 pacotes de roteamento propagados para cada pacote de dados enviados pelas aplicações. Já para o modelo MMIS esse valor aumenta cerca de 420% em comparação com o valor para o *waypoint* e aproximadamente 340% quando comparado com o modelo MMIG. Mais uma vez é identificada uma avaliação super estimada do desempenho do protocolo AODV quando se utiliza o modelo *waypoint*.

Na tabela 4.2, é apresentado o desempenho do protocolo DSR para as métricas, também, definidas na seção 4.2.1 sob a influência dos modelos *waypoint*, MMIS e MMIG. Novamente é observada uma enorme variação na taxa de entrega de pacotes com o AODV quando troca-se o modelo de mobilidade. Utilizando o *waypoint* tem-se uma taxa de entrega de aproximadamente 93,7%, entretanto, quando se usa os

Tabela 4.2: A influência dos modelos de mobilidade no desempenho do protocolo DSR.

Métrica de Desempenho	Modelo <i>Waypoint</i>	Modelo MMIS	Modelo MMIG
No. de pacotes recebidos	2.333	1.948	2020
No. de pacotes enviados	2.491	2.475	2229
Taxa de entrega	93,66%	78,71%	90,62%
No. de pacotes de roteam.	3.009	76.223	16.954
Sobrecarga de roteamento	1,21	30,79	7,61

modelos MMIS e MMIG, a taxa de entrega diminui para 78,7% e 90,6%, respectivamente. Com isso, a métrica taxa de entrega teve uma queda de aproximadamente 15% entre o *waypoint* e o MMIS, e de 3% entre os modelos *waypoint* e o MMIG. As configurações desse cenário são idênticas ao cenário anterior, onde avaliou-se o protocolo AODV.

Para a métrica sobrecarga de roteamento é observado, também o mesmo comportamento, visto que o valor para essa métrica utilizando o modelo *waypoint* é de aproximadamente 1,2 pacotes de roteamento propagados para cada pacote de dados enviados pelas aplicações. Já para o modelo MMIS esse valor aumenta cerca de 2.500% em comparação com o valor para o *waypoint* e aproximadamente 630% quando comparado com o modelo MMIG. Mais uma vez é identificada uma avaliação super estimada do desempenho do protocolo DSR quando se utiliza o modelo *waypoint*.

Para verificar a influência do tráfego na taxa de entrega dos protocolos de roteamento, é mostrada a figura 4.1. Essa análise foi realizada apenas para o modelo MMIG. Observa-se que o AODV obteve a maior taxa de entrega, mesmo aumentando o tráfego na rede. Além disso, o protocolo DSDV, que é um protocolo pró-ativo, obteve o pior desempenho, como é verificado na maioria das avaliações de desempenho disponíveis na literatura. Por esta razão, nesse trabalho, o protocolo DSDV deixou de ser avaliado.

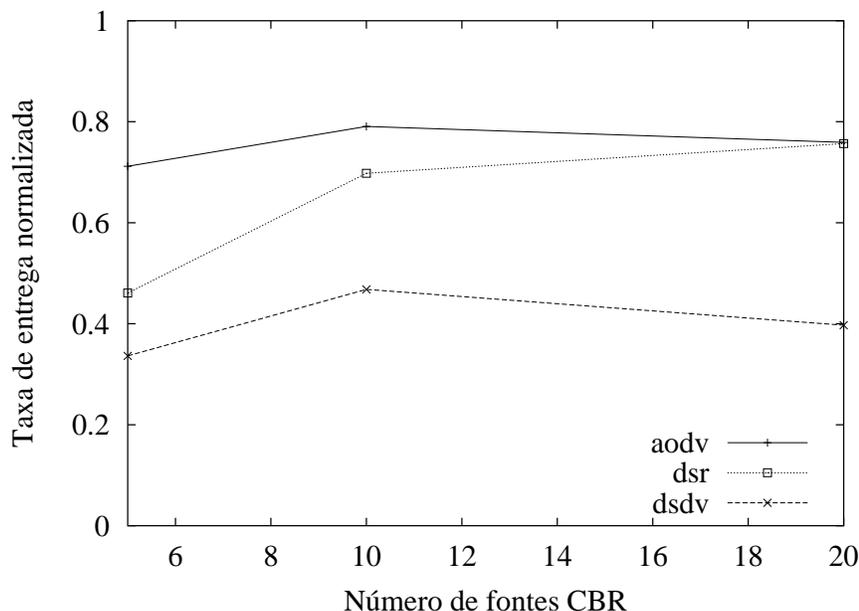


Figura 4.1: Taxa de entrega de pacotes dos protocolos de roteamento utilizando o modelo MMIG.

Na figura 4.2 é mostrado o comportamento de variação da taxa de entrega do protocolo AODV em relação ao tempo de simulação para os modelos *waypoint* e MMIG. Nessa figura observa-se uma grande variação na taxa de entrega no início da simulação e que, com o decorrer do tempo, devido à estabilidade do protocolo, essa variação tende a desaparecer.

Na figura 4.3 é apresentado o comportamento de variação da taxa de entrega do protocolo DSR em relação ao tempo de simulação para os modelos *waypoint* e MMIG. Nessa figura pode-se observar uma grande variação na taxa de entrega no início da simulação e que, com o decorrer do tempo, devido à estabilidade do protocolo, essa variação tende a desaparecer também.

Como objetivo de avaliar a influência da regra de borda escolhida, é apresentado o gráfico da figura 4.4, onde têm-se a taxa de entrega de pacotes do protocolo AODV no tempo, sob diferentes regras de borda. As regras *bounce* e *bounce* modificado provocam um impacto bastante semelhante na taxa de entrega e esse impacto é menor, cerca de 5%, ao da regra *delete and replace*. Com isso, verifica-se uma influência da regra de borda utilizada no desempenho dos protocolos de roteamento

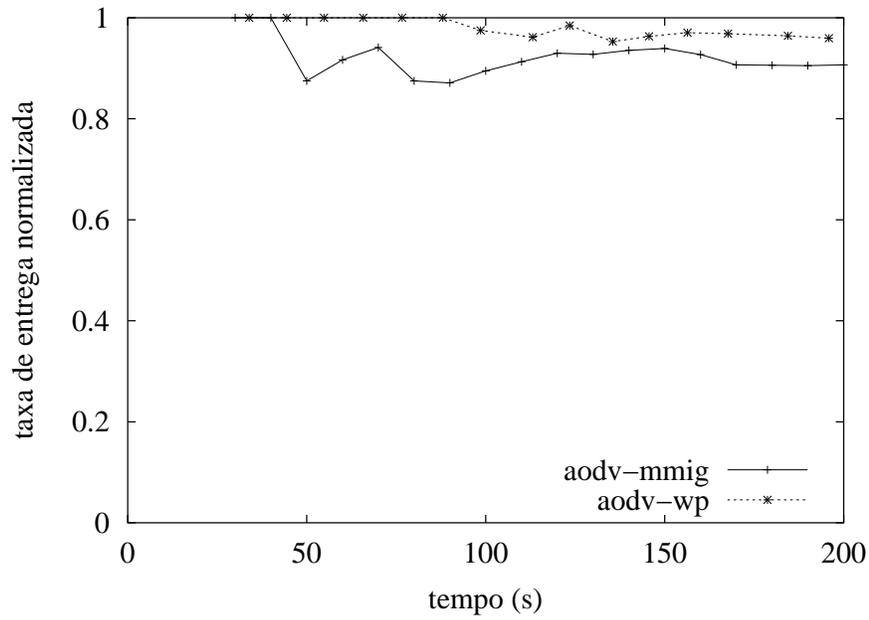


Figura 4.2: Taxa de entrega do protocolo AODV sob o impacto do modelo de mobilidade utilizado.

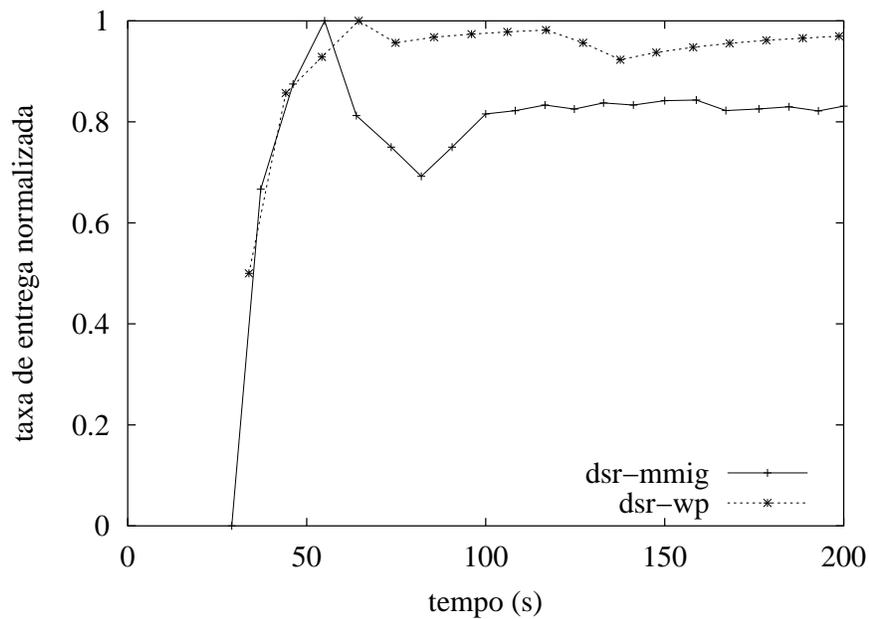


Figura 4.3: Taxa de entrega do protocolo DSR sob o impacto do modelo de mobilidade utilizado.

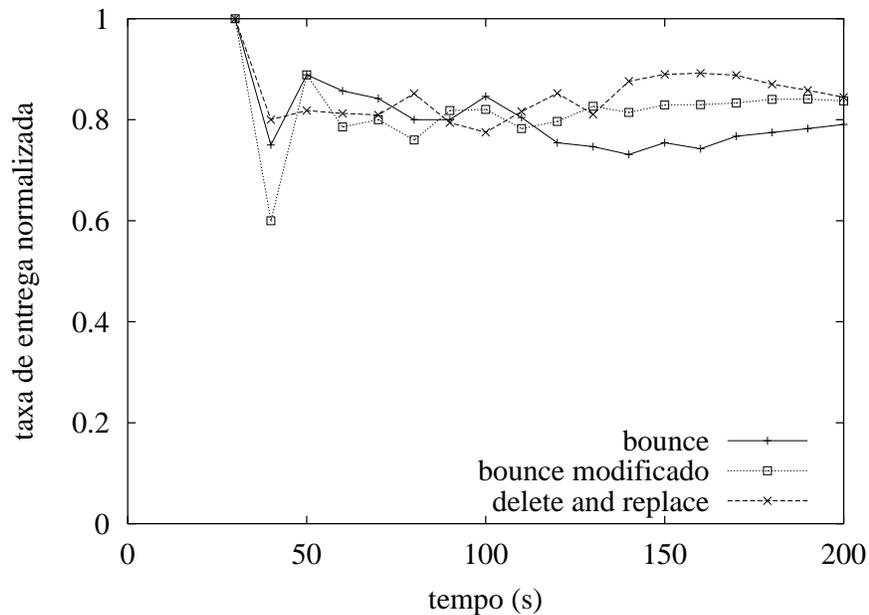


Figura 4.4: O impacto da escolha da regra de borda para o modelo MMIG no desempenho do protocolo AODV.

e assim sendo, cuidados devem ser tomados na avaliação desses protocolos.

Nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7, são apresentados o impacto da quantidade de tráfego no desempenho do protocolo AODV usando-se as regras de borda: *bounce*, *bounce modificado* e *delete and replace*, respectivamente. Nessas figuras pode ser observado a influência que uma regra de borda gera com diferentes tráfegos, em uma métrica de desempenho aos protocolos de roteamento. Essas variações comprovam a necessidade de haver critérios na utilização das regras de borda para a representação da mobilidade em redes móveis *ad hoc*, como foi descrito na seção 2.3 desse trabalho. E ainda, perceber que a regra de borda também é um parâmetro a ser levado em consideração na avaliação de desempenho dos protocolos, assim como, o modelo de mobilidade escolhido.

Por fim, recomenda-se que novos estudos sejam realizados nos protocolos avaliados nesse trabalho, como, vazão, atraso, número de saltos e densidade da rede, para que se possa observar o impacto, tanto do modelo de mobilidade, quanto da regra de borda no funcionamento dos protocolos de roteamento. Além disso, a metodolo-

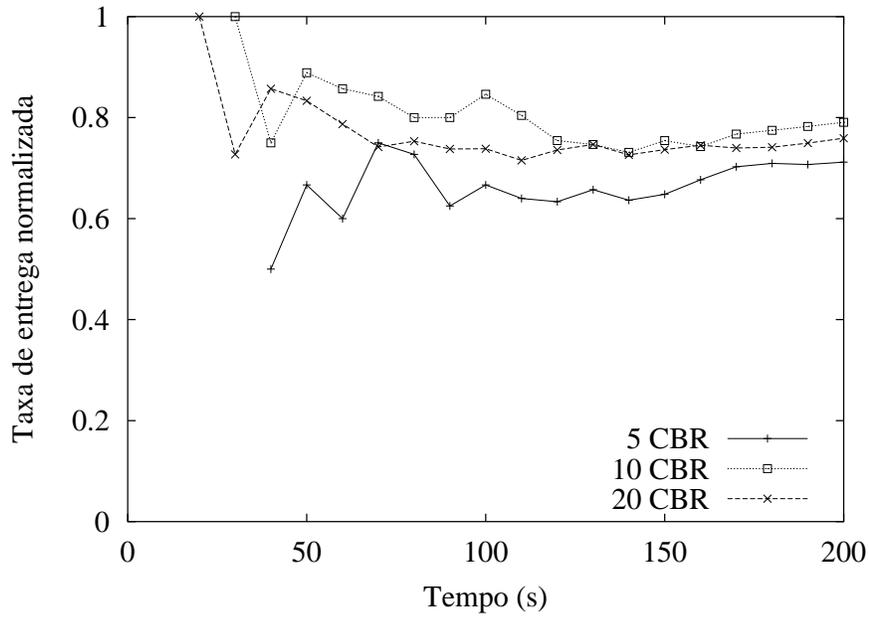


Figura 4.5: A influência do tráfego no desempenho do protocolo AODV usando a regra de borda *bounce*.

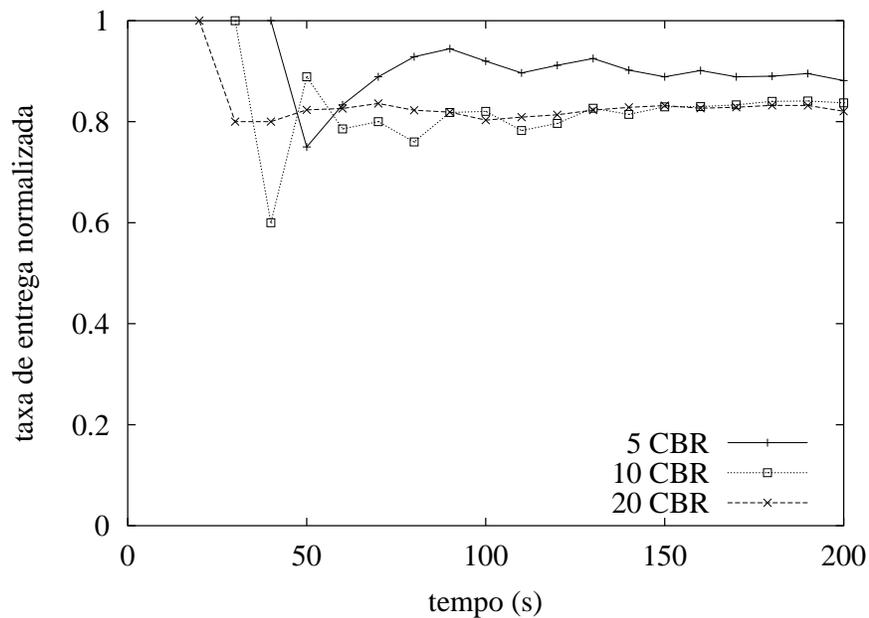


Figura 4.6: O impacto da quantidade de tráfego no desempenho do protocolo AODV usando a regra de borda *bounce* modificado.

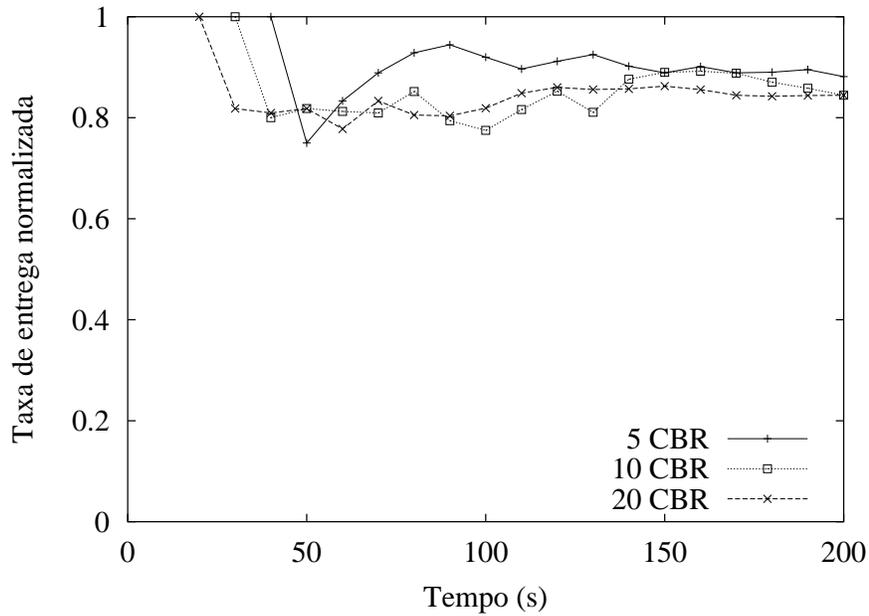


Figura 4.7: O impacto da quantidade de tráfego no desempenho do protocolo AODV usando a regra de borda *delete and replace*.

gia de avaliação utilizada nesse trabalho também pode ser aplicada na avaliação de desempenho de outros protocolos.

4.3 Aplicação dos Modelos Propostos em Outros Cenários

As características de movimentação dos usuários influenciam bastante o desempenho de subsistemas e aplicações das redes móveis *ad hoc* como mostrado na seção anterior, porém, existem poucos estudos relacionados ao impacto da mobilidade no funcionamento desses sistemas. Como sugestões de estudos, têm-se:

Novos Modelos de Mobilidade

A diversidade de cenários onde se usa uma rede *ad hoc* é muito grande, com isso, desenvolver um modelo de mobilidade que represente todos esses cenários, não é uma tarefa fácil, até mesmo porque, não se tem o padrão de movimentação dos usuários

desses cenários. Assim sendo, se faz necessário o desenvolvimento de novos modelos de mobilidade que representem comportamentos de movimentação específicos e mais realísticos.

Protocolos de Acesso ao Meio

Estudos podem ser feitos quanto a protocolos de acesso ao meio para redes *ad hoc* levando em consideração a mobilidade dos nós, além dos problemas conhecidos de terminais escondidos e expostos.

Impacto na arquitetura TCP/IP

Com a movimentação dos nós as rotas tornam-se extremamente dinâmicas, fato este que influencia o desempenho do TCP. Identifica-se como importante, o estudo do impacto da mobilidade neste contexto, onde procura-se constatar se, da mesma forma que o controle de congestionamento do TCP *Westwood* é menos sensível a erros no canal, ele também é robusto quanto à constante alteração de rotas.

Particionamento da Rede

Em casos de mobilidade em grupo, observa-se o efeito de particionamento quando formam-se grupos isolados entre si, fato este que prejudica uma série de serviços oferecidos pela rede. Através do estabelecimento de mecanismos de predição de particionamento, cria-se a possibilidade de realizar ações que visam manter os serviços operacionais, como, por exemplo, a réplica de algum servidor ou base de dados em nós que permanecerão nos grupos de interesse. Um dos problemas desta abordagem é identificar os grupos e prever qual nó estará em qual grupo, o que continua sendo objeto de estudos na área.

Capítulo 5

Conclusão e Perspectivas para Trabalhos Futuros

A DIVERSIDADE de cenários onde se usa uma rede móvel *ad hoc* é muito grande, com isso, desenvolver um modelo de mobilidade que represente todos esses cenários, não é uma tarefa fácil, até mesmo porque, não se tem o padrão de movimentação dos usuários nesses cenários.

Como foi descrito na seção 2.2, existem vários modelos de mobilidade que buscam essa representação do movimento, os quais são usados para avaliação de desempenho de aplicações e sistemas de comunicação em redes móveis *ad hoc*, principalmente em protocolos de roteamento para essas redes. Entretanto, características desses modelos restringe-os à comportamentos de movimentação específicos ou simplesmente não representam a realidade. Com isso, exige-se mais critérios na escolha do modelo de mobilidade, caso contrário pode-se ter uma avaliação dos sistemas não condizente com a realidade, como é mostrado em [2, 5, 25, 27, 47]. Assim sendo, faz-se necessário o desenvolvimento de novos modelos de mobilidade.

Dentro desse contexto, foram propostos e apresentados dois modelos de mobilidade, em que as mudanças de direção e as variações da velocidade são mais próximas da representação de cenários reais do que os modelos existentes na literatura. Os modelos propostos nesse trabalho, MMIS e MMIG, são baseados em

processos markovianos, os quais, são apropriados para modelar a movimentação de um NM de forma independente em regiões não uniformes. Eles permitem movimentos na mesma direção, em direções adjacentes, mudanças de velocidade e intervalos de pausa no movimento. Além disso, eles evitam mudanças bruscas de direção e paradas abruptas no movimento. Buscando-se assim, representar um comportamento mais realístico do movimento dos NMs em regiões urbanas e em rodovias, quando comparado aos modelos MPA e, principalmente, o *waypoint*.

Os resultados obtidos através de simulações verificaram as características modeladas analiticamente e citadas acima. Mostrando assim que, em certos casos, os modelos propostos são mais adequados que os modelos *waypoint* e MPA. Além disso, as regras de borda foram inseridas nos modelos propostos e foram apresentados os impactos dessas regras de bordas no comportamento de movimentação do modelo MMIG.

Como aplicação dos modelos de mobilidade individual, foi realizado no capítulo 4, um estudo detalhado sobre o impacto da mobilidade nos desempenho dos protocolos de roteamento AODV, DSDV e DSR. Nesse estudo foram descritas as principais características desses protocolos, as métricas de desempenho escolhidas e os resultados obtidos baseados nessas métricas. Na avaliação de desempenho dos protocolos, observou-se que o modelo de mobilidade e a regra de borda escolhida afetam em alguns casos, drasticamente, o funcionamento dos protocolos.

O estudo realizado mostra que em utilizar-se o modelo de mobilidade *waypoint*, têm-se "resultados muito otimistas", ou seja, tem-se um desempenho super estimado. Com isso, concluí-se neste trabalho que, o modelo de mobilidade escolhido, afeta drasticamente a avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento. Além disso, este trabalho motiva um reavaliação não só dos protocolos de roteamento, mas, de todos as aplicações e sub-sistemas das redes móveis *ad hoc*.

Como foi descrito nesse trabalho, a mobilidade influencia o funcionamento das redes móveis *ad hoc*. Dessa maneira, o presente trabalho apresenta algumas perspectivas de trabalhos futuros:

- aplicação do modelo MMIG na representação do movimento individual dos NMs no modelo de mobilidade em grupo - MMGPR [2]. Atualmente a representação de cada NM é baseada em um vetor aleatório e em um vetor de movimento de grupo. Pretende-se comparar os resultados obtidos dessa modificação com os do MMGPR original;
- avaliação do comportamento dos modelos propostos com a inserção de obstáculos na área de simulação;
- avaliação de desempenho dos protocolos de roteamento estudados através de outras métricas de desempenho, como: vazão, atraso, número de saltos, densidade da rede, conectividade dos nós e períodos de particionamento da rede;
- avaliação do desempenho de outros protocolos de roteamento, como: HSR [21], FSR [21], ZRP [36] e inclusive os mais recentes: OLSR [8] e TBRPF [48];
- aplicação dos novos modelos MMIS e MMIG nos cenários descritos na seção 4.3.

Referências Bibliográficas

- [1] BETTSTETTER, C. Mobility Modeling in Wireless Networks: Categorization, Smooth Movement, and Border Effects. *ACM Mobile Computing and Communications Review* 5, 3 (2001).
- [2] X. HONG, M. GERLA, G. P., AND CHIANG, C. A Group Mobility Model for Ad hoc Wireless Networks. In *Proc. of the ACM International Workshop on Modeling and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)* (aug 1999).
- [3] CORSON, S., AND MARKER, J. Mobile Ad hoc Networking (MANET). *RFC 2501* (jan 1999).
- [4] CORDEIRO, C. M., AND AGRAWAL, D. P. Mobile Ad hoc Networking. *OBR Research Center for Distributed and Mobile Computing, ECECS* (2002).
- [5] DAVIES, V. Evaluating Mobility Models within an Ad hoc Network. Tese de Mestrado, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, USA, 2000.
- [6] Mobile Ad-hoc Networks (MANET) Charter. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [7] PERKINS, C., BELDING-ROYER, E., AND DAS, S. Ad Hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing. *RFC 3561* (july 2003).
- [8] CLAUSEN, T., AND JACQUET, P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR). *RFC 3626* (october 2003).

- [9] CÂMARA, D. Estudo de Algoritmos de Roteamento para Redes Móveis Ad Hoc. Tese de Mestrado, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2000.
- [10] FALL, K., AND VARADHAN, K. *The NSManual*. The VINT Project, jan 2002.
- [11] CAMP, T., BOLENG, J., AND DAVIES, V.
- [12] ZONOOZI, M. M., AND DASSANAYAKE, P. User Mobility Modeling and Characterization of Mobility Patterns. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 15, 7 (sep 1997).
- [13] LAM, D., JANNINK, J., COX, D., AND WIDOM, J. Modeling Location Management for Personal Communication Services, 1996.
- [14] LAM, D., COX, D., AND WIDOM, J. Teletraffic Modeling for Personal Communications Services, 1997.
- [15] XUE, G. An Improved Random Walk Model for PCS Networks. *IEEE Transactions on Communications* 50, 8 (agosto de 2002).
- [16] K. DANTU, S. KAPADIA, R. S., AND A. HELMY. Modeling of Mobility-Induced Losses in MANETs (MILMAN). *ACM SIGCOMM Computer Communications Review* 32, 3 (jul 2002), 30–30.
- [17] S. R. DAS, R. CASTANEDA, J. Y., AND SENGUPTA, R. Comparative Performance Evaluation of Routing Protocols for Mobile, Ad hoc Networks. In *7th International Conference on Computer Communications and Networks (IC3N)* (oct 1998), pp. 153–161.
- [18] WANG, K. H., AND LI, B. Group Mobility and Partition Prediction in Wireless Ad-hoc Networks. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2002* (New York City, NY, USA, apr 2002).
- [19] WANG, K. H., AND LI, B. Efficient and Guaranteed Service Coverage in Partitionable Mobile Ad-hoc Networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM'02* (2002).

- [20] BARRETT, C., DROZDA, M., MARATHE, A., AND MARATHE, M. V. Characterizing the Interaction Between Routing and MAC Protocols in Ad-hoc Networks. In *The ACM Symposium on Mobile Adhoc Networking and Computing (MOBIHOC 2002)* (Lausanne, Switzerland, June 9–11 2002).
- [21] PEI, G. *Scalable Routing Strategies for Large Ad hoc Wireless Networks*. Tese de Doutorado, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, USA, 2000.
- [22] S. BASAGNI, I. CHLAMTAC, V. R. S., AND WOODWARD, B. A. A distance Routing Effect Algorithm for Mobility (DREAM). In *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 98)* (1998), pp. 76–84.
- [23] KO, Y. B., AND VAIDYA, N. H. Location-Aided Routing (LAR) in Mobile Ad hoc Networks. In *ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 98)* (1998), pp. 66–78.
- [24] JOHNSON, D. B., AND MALTZ, D. A. Dynamic Source Routing in Ad hoc Wireless Networks. *Mobile Computing* (1996).
- [25] CAMPOS, C. A. V., AND DE MORAES, L. F. M. Modelos Markovianos de Mobilidade Individual para Redes Móveis Ad hoc. In *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC2003)* (Natal, RN, Brasil, mai 2003), pp. 135–150.
- [26] C. BETTSTETTER, H. H., AND PÉRES-COSTA, X. Stochastic Properties of the Random Waypoint Mobility Model: Epoch Length, Direction Distribution, and Cell Change Rate. In *Proc. of the 5th ACM International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM)* (Atlanta, GA, sep 2002).
- [27] J. YOON, M. L., AND NOBLE, B. Random Waypoint Considered Harmful. In *Proc. of the IEEE INFOCOM'03* (2003).

- [28] NAVIDI, W., AND CAMP, T. Stationary and Distributions for the Random Waypoint Mobility Model, Technical Report MCS-03-04. Relatório técnico, The Colorado School of Mines, abril de 2003.
- [29] NAVIDI, W., CAMP, T., AND BAUER, N. Improving the Accuracy of Random Waypoint Simulations Through Steady-State Initialization, Technical Report MCS-03-08. Relatório técnico, The Colorado School of Mines, junho de 2003.
- [30] RESTA, G., AND SANTI, P. An Analysis of the Node Spatial Distribution of the Random Waypoint Mobility Model for Ad hoc Networks. In *Proceedings of the second ACM international workshop on Principles of mobile computing* (2002), ACM Press, pp. 44–50.
- [31] CHIANG, C. *Wireless Networks Multicasting*. Tese de Doutorado, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, USA, 1998.
- [32] KLEINROCK, L. *Queueing Systems*, vol. I. John Wiley & Sons, New York, USA, 1975.
- [33] JARDOSH, A., BELDING-ROYER, E. M., ALMERTH, K. C., AND SURI, S. Towards Realistic Mobility Models for Mobile Ad hoc Networks. In *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking* (2003), ACM Press, pp. 217–229.
- [34] YOON, J., LIU, M., AND NOBLE, B. Sound Mobility Models. In *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking* (2003), ACM Press, pp. 205–216.
- [35] SANCHEZ, M. Mobility Models. <http://www.disca.upv.es/misan/mobmodel.htm>. Visitado em 20/04/2002.
- [36] HAAS, Z. J., AND PEARLMAN, M. R. The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol. In *ACM SIGCOMM* (1998), pp. 167–177.
- [37] DA SILVA, A. P. C. Métodos de Solução para Modelos Markovianos com Recompensa. Tese de Mestrado, Programa de Engenharia de Sistemas e Com-

- putação, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- [38] CAMPOS, C. A. V., DA SILVA, A. M., OTERO, D. C., DE ALBUQUERQUE, L. R., AND DE MORAES, L. F. M. Mobilidade em Redes Sem Fio Ad hoc. In *Minicurso do V Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel (WCSF2003)* (São Lourenço, MG, Brasil, oct 2003), pp. 1–40.
- [39] QIMING, L. The Scenario Generator: a tool to generate MANET mobility scenarios for NS-2. <http://www.comp.nus.edu.sg/liqm/scengen/>. Visitado em 10/05/2002.
- [40] ILYAS, M. *The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks*. CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 2003.
- [41] TOH, C.-K. *Ad Hoc Mobile Wireless Networks Protocols and Systems*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
- [42] IEEE P802.11: The Working Group for Wireless LANs. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/index.html>.
- [43] PERKINS, C. E., AND BHAGWAT, P. Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers. In *ACM SIGCOMM* (oct 1994), vol. 24, pp. 234–244.
- [44] PERKINS, C. E., AND ROYER, E. Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing. In *Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications* (New Orleans, LA, feb 1999).
- [45] PARK, V. D., AND CORSON, M. S. A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. In *Proceedings of IEEE INFOCOM'97* (apr 1997), pp. 1405–1413.
- [46] SU, W. W. *Motion Prediction in Mobile/Wireless Networks*. Tese de Doutorado, Department of Computer Science, University of California, Los Angeles, USA, 2000.

- [47] JOHANSSON, P., LARSSON, T., HEDMAN, N., MIELCZAREK, B., AND DEGERMARK, M. Scenario-Based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks. In *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking* (1999), ACM Press, pp. 195–206.
- [48] BELLUR, B., OGIER, R. G., AND TEMPLIN, F. L. Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). *Internet Draft, draft-ietf-manet-tbrpf-01.txt* (march 2001).
- [49] NS-2 and Adhockey. <http://www.monarch.cs.rice.edu/ns-faq/faq.html>.

Apêndice A

Implementação da Modelagem

Proposta

A MODELAGEM proposta foi implementada na linguagem de programação C++ e incorporada ao conjunto de modelos de mobilidade do Gerador de Cenários ScenGen. A seguir é apresentado o código do modelo MMIG, através do arquivo *mmig.cc*.

Posterior ao código do modelo MMIG, é apresentado trecho de código que deve ser acrescentado no ScenGen para a configuração das características do modelo proposto. É exatamente neste arquivo, o *model-spec*, que o usuário altera os parâmetros para a geração de perfis de mobilidade específicos. Segue ainda o trecho de código que, também deve ser acrescentado no ScenGen, para a configuração das características do cenário de redes *ad hoc* a ser simulado.

Arquivo: **mmig.cc**

```
//  
// MMIG.cc  
//  
// Model using Markov Chain  
  
#include "defs.h"  
  
#include "modelspec.h"  
#include "mmig.h"
```

```
#include <math.h>

#define NUM_STATES 3

int *states_x;
int *states_y;
int num_states;
int num_max_inc;
double base;

double **matrix_prob, prob_m;
float increment, time_movement, speed;

// Constructor
MMIG::MMIG() : Model()
{
    type_ = MODEL_MMIG;

    randomPos_ = true;
}

// Destructor
MMIG::~MMIG()
{
}

// Member functions

// initialize the model. prepare for the movement generation
void MMIG::init(model_time_t startTime, \
                model_time_t stopTime, \
                node_id_t startID, \
                int num_nodes, \
                Area *area, \
                bool cp)
{
    Model::init(startTime, stopTime, startID, num_nodes, area, cp);

    assert(paramList_ != NULL);

    // init parameters
    //float inc=getf("inc");
    increment=getf("XY_increment");
    time_movement=getf("T_move");
    num_max_inc=geti("Veloc_max");
    prob_m=getf("Prob_m");
    base=getf("Base");
    border_rule=geti("Border_Rule");
}
```

```

    initialized_ = true;

    //alloc memory for the states matrix
    states_x=(int *)malloc(num_nodes*sizeof(int));
    if(states_x==NULL)
    {
printf("Error alloc memory!!");
exit(-1);
    }

    states_y=(int *)malloc(num_nodes*sizeof(int));
    if(states_y==NULL)
    {
        printf("Error alloc memory!!");
exit(-1);
    }

    num_states=ceil(fabs((log(num_max_inc)/log(base)) *2+1));

    matrix_prob=(double **)malloc((num_states)*sizeof(double*));
    if(matrix_prob==NULL)
    {
        printf("Error alloc memory!!");
exit(-1);
    }

    for (int i=0;i<num_states;i++)
    {
        matrix_prob[i]=(double*)malloc((num_states)*sizeof(double));

        if(matrix_prob[i]==NULL)
        {
            printf("Error alloc memory!!");
exit(-1);
        }
    }

    //transitions from 0 to other states

    double prob_left=prob_m;
    double prob_right=prob_m;
    matrix_prob[0][0]=1-2*prob_m;
    for(int j =1;j<num_states;j++)
    {
if(!(j%2))
//states on the right
{
if((j==(num_states-1)) )
{
matrix_prob[0][j]=prob_right;
}
else
{
matrix_prob[0][j]=prob_right/2;
prob_right-=matrix_prob[0][j];
}
}

```

```

}
else //states on the left
{
if( (j==(num_states-2)))
{
matrix_prob[0][j]=prob_left;
}
else
{
matrix_prob[0][j]=prob_left/2;
prob_left-=matrix_prob[0][j];
}
}

//transitions from other states (except zero state)
for(int i =1;i<num_states;i++)
{
double prob_down=prob_m;
double prob_up=prob_m;

//transitions from and to the same state
if(i==(num_states-2) || i==(num_states-1))
{
matrix_prob[i][i]=1-prob_m;
}
else
matrix_prob[i][i]=(1-2*prob_m);

//transitions to upper states - sum of upper probabilities = m
for(int j=i+1;j<num_states;j++)
{
if(((j%2) && (i%2)) || (!(j%2))&&(!(i%2))) )
{
if((j==(num_states-1)) || (j==(num_states-2)))
{
matrix_prob[i][j]=prob_up;
}

else
{
matrix_prob[i][j]=prob_up/2;
prob_up-=matrix_prob[i][j];
}
}
else
matrix_prob[i][j]=0;
}

//transitions to lower states - the of lower probabilities = m
for(int j=i-1;j>0;j--)
{
if(((j%2) && (i%2)) || (!(j%2))&&(!(i%2))) )
{
matrix_prob[i][j]=prob_down/2;
prob_down-=matrix_prob[i][j];
}
}

```

```
else
matrix_prob[i][j]=0;
}

if(i!=0) matrix_prob[i][0]=prob_down;

/*for(int j=0 ;j<num_states;j++)
{
if (i==0)
{
if (j==0)
{
(matrix_prob[i][j]=1-2*prob_m);
}
else
{
if(j%2)
{
if(j!=num_states-1)
{
matrix_prob[i][j]=prob_up/2;
prob_up-=matrix_prob[i][j];
}
else
{
matrix_prob[i][j]=prob_up;
}
}
else
{
if(j!=num_states-2)
{
matrix_prob[i][j]=prob_down/2;
prob_down-=matrix_prob[i][j];
}
else
{
matrix_prob[i][j]=prob_down;

}
}
}
}
else
{
if(i==j)
{
if(j==num_states-2 ||j==num_states-1)
{
matrix_prob[i][j]=1-prob_m;
}
else
matrix_prob[i][j]=(1-2*prob_m);
}
else
{
```

```
if (i%2)
{
if(!(j%2))
{
matrix_prob[i][j]=0;
}
else if(j>i)
{
if(j!=(num_states-1))
{
matrix_prob[i][j]=prob_up/2;
prob_up-=matrix_prob[i][j];
}
else
{
matrix_prob[i][j]=prob_up;
}
}
else
{
if(j!=0)
{
matrix_prob[i][j]=prob_down/2;
prob_down-=matrix_prob[i][j];
}
else
{
matrix_prob[i][j]=prob_down;
}
}
}
else
{
if((j%2) && j!=0)
{
matrix_prob[i][j]=0;
}
else
{
if(j<i)
{
if(j!=0)
{
matrix_prob[i][j]=prob_up/2;
prob_up=prob_up-matrix_prob[i][j];
}
else
{
matrix_prob[i][j]=prob_up;
}
}
else
{
if(j!=num_states-2)
{
matrix_prob[i][j]=prob_down/2;
```

```

prob_down=matrix_prob[i][j];
}
else
{
matrix_prob[i][j]=prob_down;
}
}
}
}
}
}
}

}*/
}

FILE * paru;

paru=fopen("matrix.out","w");
fprintf(paru,"numero de estados=%d",num_states);
for (int i=0;i<num_states;i++)
{
fprintf(paru,"\n");
for (int j=0;j<num_states;j++)
{
fprintf(paru," %.5f ",matrix_prob[i][j]);
}
}
}

//

void MMIG::makeMove(Node *node)
{
    assert (node != NULL);
    if (node->numMoves_ == 0)
    { // first move should be made
        // choose initial position only
        area_->randomPos(node->pos_);
        node->dest_ = node->pos_;
        node->startTime_ = startTime_;

        // this is the initial pause time
        node->arrivalTime_ = startTime_;
        node->nextStartTime_ = startTime_;
        node->speed_ = 0.0;
        states_x[node->id_]=0;
        states_y[node->id_]=0;
    } else
    { // following moves
        node->pos_=node->dest_;

//Algorithm of states change in X & Y

        int row=states_x[node->id_];
        double random_value=(double)random()/RAND_MAX;
        double prob=0;

```

```

double change_x=0,change_y=0, new_pos;
for(int i=0;i<num_states;i++)
{
prob=prob+matrix_prob[row][i];
if(random_value<prob || i==(num_states-1))
{
states_x[node->id_]=i;
break;
}
}
if (states_x[node->id_]==0)
{
node->dest_.x_=node->pos_.x_;
change_x=0;
}
else
{
int q=(states_x[node->id_]-1)/2;
int signal=(int)pow(-1.0,states_x[node->id_]);
change_x=increment*signal*pow((double)base,(double)q);
new_pos=node->pos_.x_+change_x;

//Border Rule

if(new_pos<0 ||new_pos>area_->maxX())
{
if(border_rule==0) //Bounce rule
node->dest_.x_=node->pos_.x_-change_x;
else if(border_rule==1) //regra wrap around
{
if(new_pos<0) node->dest_.x_=new_pos+area_->maxX();
else node->dest_.x_=new_pos-area_->maxX();
}
else if(border_rule==2) //Modified bounce rule
{
random_value=(double)random()/RAND_MAX;
if(new_pos<0) node->dest_.x_=0+(-1)*new_pos*sin(M_PI*random_value);
else node->dest_.x_=area_->maxX()+(-1)*(new_pos-area_->maxX())*cos(M_PI*random_value);
}
else if(border_rule==3) //Delete-replace rule
{
random_value=(double)random()/RAND_MAX;
node->dest_.x_=area_->maxX()*random_value;
}
}
else
{
node->dest_.x_=new_pos;
}
}

row=states_y[node->id_];
random_value=(double)random()/RAND_MAX;
prob=0;
for(int i=0;i<num_states;i++)
{

```

```

prob=prob+matrix_prob[row][i];
if(random_value<prob || i==(num_states-1))
{
states_y[node->id_]=i;
break;
}
}
if (states_y[node->id_]==0)
{
node->dest_.y_=node->pos_.y_;
change_y=0;
}
else
{
int q=(states_y[node->id_]-1)/2;
int signal=(int)pow(-1.0,states_y[node->id_]);
change_y=increment*signal*pow((double)base,(double)q);
new_pos=node->pos_.y_+change_y;
if(new_pos<0 || new_pos>area_->maxY())
{
if(border_rule==0)
node->dest_.y_=node->pos_.y_-change_y;
else if(border_rule==1)
{
if(new_pos<0) node->dest_.y_=new_pos+area_->maxY();
else node->dest_.y_=new_pos-area_->maxY();
}
else if(border_rule==2)
{
random_value=(double)random()/RAND_MAX;
if(new_pos<0) node->dest_.y_=0+(-1)*new_pos*sin(M_PI*random_value);
else node->dest_.y_=area_->maxY()+(-1)*(new_pos-area_->maxY()*cos(M_PI*random_value);
}
else if(border_rule==3)
{
random_value=(double)random()/RAND_MAX;
node->dest_.y_=area_->maxY()*random_value;
}
}
else
{
node->dest_.y_=new_pos;
}
}

//set a speed
node->speed_= (double) pow((pow(change_x,2.0)+pow(change_y,2.0)),0.5) / (double)time_movement;

// update the times
node->startTime_ = node->nextStartTime_;
node->arrivalTime_ = node->startTime_ + time_movement;
node->nextStartTime_ = node->arrivalTime_;

//node->pos_=node->dest_;
} // if-else
}

```

Arquivo: **model-spec**(Código no ScenGen que deve ser acrescentado para o funcionamento do modelo proposto. Para a geração de perfis de mobilidade específicos, basta modificar o conteúdo das variáveis: *T_move*, *Veloc_max*, *Prob_m*, *Base* e *Border_Rule*)

```
#####  
## The Generic Individual Mobility Markovian model  
#####  
  
[MMIG]  
  
# Setup the interval of time of simulation round  
T_move=1  
  
# The increment on a move  
XY_increment=1  
  
Veloc_max=16  
  
Prob_m=0.4  
  
Base=2  
  
Border_Rule=0
```

Arquivo: **scen-spec** (Arquivo de configuração do cenário de simulação)

```
[Global]  
area = rect(700,500)  
start_time = 0  
stop_time = 500  
num_nodes = 50  
member_model.Border_Rule=3
```

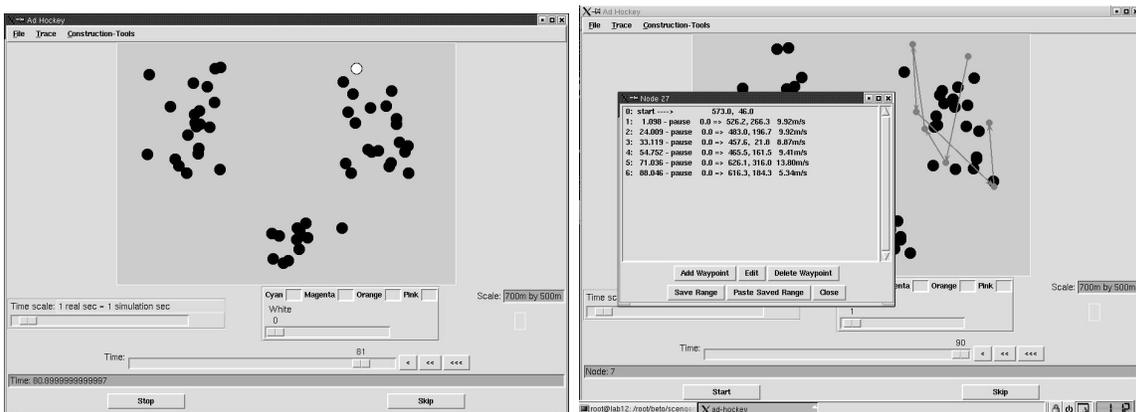
Apêndice B

O *Scenario Generator* – ScenGen

B.1 A Ferramenta

Com o objetivo de desenvolver simulações em redes móveis *ad hoc*, Li Qiming, um pesquisador da Universidade de Singapura, desenvolveu o gerador de cenários ScenGen [39]. O ScenGen é uma ferramenta destinada a gerar cenários de mobilidade, através de modelos de mobilidade ou a partir de *traces* de movimentação dos nós da rede, exibindo uma saída configurada para o uso no simulador de rede NS.

A ferramenta Adhockey [49], que é integrada ao NS, pode ser utilizada para a visualização da movimentação dos nós dentro do cenário gerado, como pode ser visto nas figuras B.1(a) e B.1(b).



(a) Visualizando o cenário

(b) Visualizando o *trace* de movimentação

Figura B.1: O visualizador Adhockey

O ScenGen foi desenvolvido na linguagem C++ e implementa os seguintes mode-

los de mobilidade: *Random Waypoint*, *Pursue*, *Gauss-Markov*, *Brownian*, *Column*.

O ScenGen dá suporte à alteração dos modelos existentes e também à inclusão de novos modelos. Todos os modelos são implementados em linguagem C++ através de uma classe com herança da classe **model** (já implementada pelo ScenGen). Dentro da classe que representa o modelo, existem dois métodos indispensáveis para a simulação: o **init** e o **makeMove**.

init: método chamado para carregar os parâmetros iniciais necessários para o modelo. Neste método devem ser carregados parâmetros iniciais tais como velocidade máxima, semente inicial da simulação, regra de borda a ser utilizada, etc. Estes parâmetros são lidos do arquivo **scen-spec**.

cabeçalho (*header*) da função **init**:

```
init(model_time_t startTime, model_time_t stopTime, node_id_t
startID, int num_nodes, Area *area, bool cp)
```

Os parâmetros que estão no cabeçalho da função devem ser repassados para a função **init** da classe pai **Model**. No método **Model::init** são definidas as características do cenário, tais como número de nós, tempo inicial, tempo final, área de simulação, etc.

makeMove: método chamado para calcular a próxima posição de um nó presente na simulação. Para estabelecer a próxima movimentação do nó, o ScenGen chama esta função passando como parâmetro o nó a sofrer movimentação. Deste modo as variáveis que representam a velocidade e posição deste nó devem ter seus valores atribuídos neste método respeitando as regras do modelo de mobilidade implementado.

cabeçalho da função **makeMove**:

```
makeMove(Node *node)
```

B.1.1 Configurações da Simulação

Todos os parâmetros admitidos por cada modelo estão presentes no arquivo **model-spec**. Dentro deste arquivo também encontra-se o valor padrão para cada parâmetro. O arquivo **scen-spec** por sua vez representa um cenário a ser simulado, ou seja, os parâmetros presentes neste arquivo se referem somente a este cenário.

Dentro do arquivo **scen-spec** existe uma seção chamada global que deve conter configurações referentes ao:

- Tamanho da área retangular de simulação;
- Tempo de início da simulação;
- Tempo de término da simulação.

Além da seção global, para cada grupo presente na simulação existe uma seção nomeada com o nome do grupo e possui como parâmetros: o número de nós presentes neste grupo, o modelo que rege o movimento destes nós e outros parâmetros referentes ao modelo simulado. Os parâmetros do modelo que não são referenciados no **scen-spec** serão inicializados com o valor padrão contido no arquivo **model-spec**.

Exemplo de um arquivo **model-spec**:

```
#####  
## The Waypoint model  
#####  
  
[Waypoint]  
  
# The pause time  
T_min = 0  
T_max = 0  
T_dist = uniform  
  
# The min and max speed  
V_min = 0  
V_max = 30  
V_dist = uniform  
  
#####  
## The Generic Individual Mobility Markovian model  
#####  
  
[MMIG]
```

```
T_move=1

# The increment on a move
XY_increment=1

Veloc_max=16

Prob_m=0.4

Base=2

Border_Rule=0
```

Exemplo de um arquivo **scen-spec**:

```
[Global]
area = rect(700,500)
start_time = 0
stop_time = 150
num_nodes = 50
member_model.Border_Rule=3
```

Para alterar um modelo existente deve-se alterar a classe que representa o modelo em questão. As alterações com relação aos parâmetros devem ser refletidas no arquivo **model-spec** e no método **init** da classe. Já as alterações referentes a mobilidade dos nós devem ocorrer no método **makeMove**.

B.1.2 Adicionando um Modelo

Para adicionar um modelo à ferramenta deve-se criar um arquivo com o código do novo modelo na linguagem C++. Este código deve estar estruturado em uma classe com herança da classe **model**, que é implementada pelo ScenGen. Dentro desta classe todo o código que representa o movimento dos nós deve estar no método **makeMove**. Este método é chamado sempre que a ferramenta necessite calcular a próxima posição de um nó. Deste modo, as variáveis que representam a velocidade e a posição, devem ter seus valores atribuídos neste método.

Todo nó da simulação é um objeto da classe **node**. Esta classe possui algumas propriedades relativas à movimentação do nó. Estas propriedades são:

`node->dest_` : representa a posição de destino que o nó possuirá após a execução do movimento atual. É representada por uma estrutura que contém os valores x e y de uma posição dentro da área de simulação.

`node->pos_` : representa a posição atual do nó. É representada por uma estrutura que contém os valores x e y de uma posição dentro da área de simulação.

`node->startTime_` : representa o tempo em que o nó irá iniciar o movimento atual.

`node->arrivalTime_` : representa o tempo em que o nó irá atingir a posição `node->dest_`.

`node->nextStartTime_` : representa o tempo em que o nó irá iniciar o próximo movimento.

`node->speed_` : representa a velocidade do nó no movimento atual.

Assim, as variáveis descritas acima devem ter os respectivos valores atribuídos (no método **makeMove**) para que a movimentação ocorra corretamente.

Após criar o código para o modelo deve-se acrescentar no arquivo **model.h** a linha “enum NomeModelo” para que o ScenGen possa fazer referência ao novo modelo. Também deve-se acrescentar no arquivo **modelspec.cc** uma chamada para o modelo, como no exemplo abaixo, no método **ModelSpec::createModelByName()**:

```
else if (! strcmp(modelName, "NomeModelo")) {  
    model = new NomeModelo ();  
}
```

Vale lembrar que todos os parâmetros que serão fornecidos ao modelo devem estar presentes no arquivo **model-spec**.

Como o ScenGen deve ser recompilado após a adição de um novo modelo, o arquivo **Makefile** deve conter os arquivos com o código da implementação que foi criado. Além disso, o arquivo **modelspec.cc**, que foi alterado para incluir uma

chamada para o novo modelo, agora deve conter um `#include` para o arquivo com o cabeçalho (arquivo com extensão `.h`) da classe criada.

Apêndice C

Network Simulator – NS

O simulador de redes NS [10] simula eventos discretos, permitindo a execução de simulações de diversos tipos de redes e componentes: cabeadas, sem fio, locais, via satélite e também redes *ad hoc*. É o simulador mais utilizado e referenciado na literatura. O núcleo do simulador foi implementado com a linguagem C++ e para a sua manipulação utiliza-se a linguagem OTcl.

O NS apresenta-se organizado de maneira que sua utilização torna-se bastante flexível. Seus scripts de configuração podem ser criados de diferentes maneiras, porém determinados parâmetros de entrada, como era de se esperar, devem ser informados obrigatoriamente.

É possível obter parâmetros de entrada através de linha de comando, dispostos no próprio *script* principal de entrada para o NS, ou mesmo através da inclusão de outros arquivos de configuração complementares nesse *script* principal.

O *script* de entrada para o NS utiliza a linguagem TCL, nele a quantidade de nós, o padrão de mobilidade, protocolo de roteamento, dentre outras características importantes para o cenário da simulação são informados. Nesse *script* também deve-se informar quais camadas de rede devem ser simuladas, aquelas selecionadas terão seus dados de simulação incluídos no arquivo de trace gerado pelo NS.

Estão listadas a seguir as informações incluídas no *script* TCL que são esperadas como parâmetros de entrada pelo simulador:

- Características da Topologia;
- Indicação de quais camadas devem ser simuladas;
- Padrão de movimento;
- Tipo de tráfego gerado pela comunicação entre os nós;
- Estabelecer quais dados devem ser gerados pela simulação;

Um ponto importante em relação a configuração dos cenários de simulação é justamente qual padrão de mobilidade utilizar. Para gerar a movimentação dos nós segundo um determinado padrão de mobilidade podem ser utilizadas as ferramentas: SETDEST, que já vem no pacote do simulador, o SCENGEN e o *BonnMotion*, que são ferramentas adicionais que geram cenários de mobilidade compatíveis com o NS.

Todas essas ferramentas devem ser configuradas de acordo com o modelo de mobilidade desejado, e quando executadas geram um arquivo de *trace* contendo cada movimento feito pelos nós. É justamente esse arquivo que o NS espera receber como entrada para simular a movimentação dos nós. A forma como configurar e executar essas ferramentas fogem ao escopo desse trabalho, mas essas tarefas são a princípio simples, além da documentação das mesmas mostrar-se adequada e suficiente.

Visualizar graficamente as simulações feitas no NS é realmente muito útil, e com este objetivo pode ser usada a ferramenta *Network AniMator* - NAM. O uso dessa ferramenta é particularmente importante em simulações relativas a modelos de mobilidade, onde deseja-se observar a movimentação dos nós.

Quando o NS termina a execução de uma simulação ele gera um arquivo *.nam*, como mencionado anteriormente. Esse arquivo é usado pelo NAM para mostrar na tela do computador a simulação, com a movimentação dos nós, a comunicação entre eles e tudo mais que tiver sido gerado nesse arquivo de entrada.

Antes mesmo de executar a simulação no NS, pode-se ter em mãos o arquivo contendo o padrão de movimentação dos nós. O conteúdo desse arquivo pode ser visualizado graficamente sem a necessidade de realizar a simulação, pois para isso

existe a ferramenta Ad Hockey, que espera como parâmetro de entrada arquivos gerados pelo SCENGEN ou SETDEST. O auxílio dessa ferramenta (Ad Hockey) é de grande valor, tendo em vista que a movimentação desejada pode ser ostensivamente estudada antes mesmo de realizar-se uma simulação.

Como foi mostrado neste apêndice, o NS é um simulador de redes bastante abrangente e genérico, o que o torna muito utilizado pela comunidade científica.